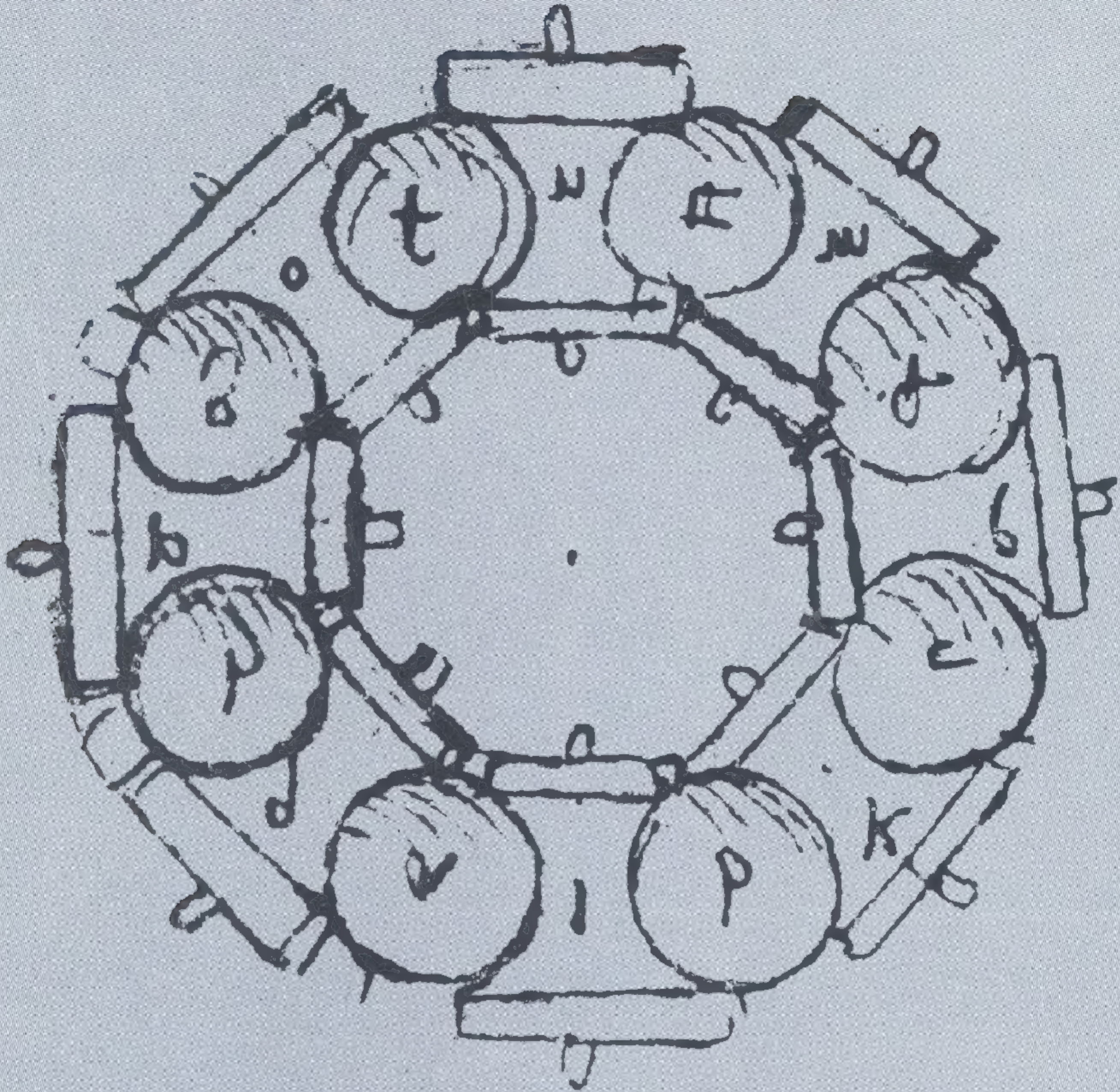


الطبعة الخامسة

بوش

أساسيات الفيزياء

[illegible]

الدار الدولية للنشر والتوزيع

القاهرة - الكويت - لندن

أساسيات الفيزياء

تأليف
ف. بوش

استاذ الفيزياء بجامعة دايتون

ترجمة

الدكتور محمد أمين سليمان
قسم الفيزياء - كلية العلوم
جامعة القاهرة

الدكتور سعيد الجزيري
قسم الفيزياء - كلية العلوم
جامعة القاهرة

مراجعة

الاستاذ الدكتور محمد عبد المقصود النادى

استاذ الفيزياء النووية
كلية العلوم - جامعة القاهرة



الدار الدولية للنشر والتوزيع

حقوق النشر

الطبعة الإنجليزية : حقوق التأليف والنشر © ١٩٦٥ ، ١٩٧٢ ، ١٩٧٧
دار ماكجروهيل للنشر - جميع الحقوق محفوظة

PRINCIPLES OF PHYSICS

F. Bueche

الطبعة العربية الأولى : حقوق التأليف والنشر © ١٩٨٢
دار ماكجروهيل للنشر - جميع الحقوق محفوظة

الطبعة العربية الثانية : حقوق الطبع والنشر © ١٩٨٨
الدار الدولية للنشر والتوزيع - جميع الحقوق محفوظة

الطبعة العربية الثالثة : حقوق الطبع والنشر © مارس ١٩٨٩
الدار الدولية للنشر والتوزيع - جميع الحقوق محفوظة

الطبعة العربية الرابعة : حقوق الطبع والنشر © سبتمبر ١٩٨٩
الدار الدولية للنشر والتوزيع ، جميع الحقوق محفوظة

الطبعة العربية الخامسة : حقوق الطبع والنشر © أغسطس ١٩٩٠ ، جميع الحقوق محفوظة للناشر

الدار الدولية للنشر والتوزيع

ص.ب ٥٥٩٩ هليوبوليس غرب - القاهرة

ت : ٢٥٨٢٨٨٧

تلکس : ٢٠٠٧١/٢٠٠٧٠ PBCRB UN

فاکس : ٠٠٢٠٢/٢٩١٨٠٥٩

لا يجوز نشر أى جزء من هذا الكتاب أو اختزان مادته بطريقة الاسترجاع أو نقله على أى وجه أو بأى طريقة سواء كانت اليكترونية أو ميكانيكية أو بالتصوير أو بالتسجيل أو خلاف ذلك إلا بموافقة الناشر على هذا كتابة ومقدماتاً .

ISBN: 07 084284 1

معاملات التحويل

ميزت التحويلات المضبوطة بالعلامة النجمية °. وللإختصار فإن معاملات التحويل قد كتبت في الصورة اللابعدية. ولإستخدام هذه المعاملات يلاحظ أن الصورة الرمزية 2.54 cm/in تعنى أن هناك 2.54cm في كل 1 inch. وعند ضرب كمية معينة في أحد هذه المعاملات فإن وحدات هذه الكمية فقط هي التي تتغير. وعلى سبيل المثال فإن

$$30 \text{ in} = (30 \text{ in}) \left(2.54 \frac{\text{cm}}{\text{in}}\right) = 76.2 \text{ cm}$$

$$5 \text{ cm} = (5 \text{ cm}) \left(2.54 \frac{1}{\text{cm/in}}\right) = 1.97 \text{ in}$$

الطول

- * 2.54 cm/in
- * 0.3048 m/ft
- * 1.609344 km/mi
- 9.461 x 10¹⁵ m/light-year

الزمن

- * 86,400 s/day
- 3.16 x 10⁷ s/yr

الكتلة

- 1.6606 x 10⁻²⁷ kg/u
- 6.022 x 10²⁶ u/kg

السرعة

- * 0.3048 (m/s)/(ft/s)
- 60 (mi/h)/88 (ft/s)
- 1.47 (ft/s)/(mi/h)
- 0.447 (m/s)/(mi/h)
- 1.609 (km/h)/(mi/h)

القوة

- * 10⁵ dyn/N
- 4.45 N/lb
- 0.225 lb/N
- 1 kg weighs 2.21 lb at g
- = 9.80 m/s²

الضغط

- * 1.01325 x 10⁵ (N/m²)/atm
- * 1.01325 bars/atm
- * 0.10 (N/m²)/(dyn/cm²)
- 6.895 x 10³ (N/m²)/(lb/in²)
- 133.32 (N/m²)/mm Hg at 0°C
- 76 cm Hg/atm
- 14.7 (lb/in²)/atm
- 1 Torr/mm Hg

الشغل والطاقة

- * 10⁷ ergs/J
- * 4.184 J/cal
- * 3.60 x 10⁶ J/kWh
- * 1054 J/Btu
- 1.6022 x 10⁻¹⁹ J/eV
- 6.242 x 10¹⁸ eV/J
- 0.239 cal/J
- 0.738 ft.lb/J
- 23.06 (kcal/g mol)/(eV/molecule)
- 1 u→931.5 MeV

القدرة

- 746 W/hp
- 550 (ft.lb/s)/hp

الكهربائية

- 1.6022 x 10⁻¹⁹ C/electron charge
- 96.485 C/faraday
- * 10⁴ G/T

معطيات وثوابت فيزيائية

سرعة الضوء	c	$= 2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$
ثابت الجاذبية	G	$= 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$
عدد أفوجادرو	N_A	$= 6.022 \times 10^{26} \text{ particles/kg.atom}$
ثابت بولتزمان	k	$= 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
ثابت الغاز	R	$= 8314 \text{ J/(kg)(mol)(K)}$ $= 1.9872 \text{ kcal/(kg)(mol)(K)}$
ثابت بلانك	h	$= 6.6262 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
شحنة الإلكترون	e	$= 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$
كتلة السكون للإلكترون	m_e	$= 9.1095 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $= 5.4859 \times 10^{-4} \text{ u}$
كتلة السكون للبروتون	m_p	$= 1.67265 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $= 1.0072766 \text{ u}$
كتلة السكون للنيوترون	m_n	$= 1.67495 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $= 1.0086650 \text{ u}$
ثابت المجاوزية (السماحية)	ϵ_0	$= 8.85419 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$
ثابت الانفاذية	μ_0	$= 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
تسارع الجاذبية العياري	g	$= 9.80665 \text{ m/s}^2 = 32.17 \text{ ft/s}^2$
كتلة الأرض		$5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$
متوسط نصف قطر الأرض		$6.37 \times 10^6 \text{ m}$
متوسط كثافة الأرض		5.57 g/cm^3
متوسط المسافة بين الأرض والقمر		$3.84 \times 10^8 \text{ m}$
متوسط المسافة بين الأرض والشمس		$1.496 \times 10^{11} \text{ m}$
كتلة الشمس		$1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$
نصف قطر الشمس		$7 \times 10^8 \text{ m}$
شدة الاشعاع الشمسي عند الأرض		$0.032 \text{ cal/(cm}^2)(\text{s}) = 0.134 \text{ J/(cm}^2)(\text{s})$

المحتويات

مقدمة

١	١ - المتجهات والقوى المتزنة	١
٢	المتجهات ١ - ١	٢
٤	متجهات أخرى غير الازاحة ٢ - ١	٤
٥	المركبات المتعامدة للمتجهات ٣ - ١	٥
٧	الطرق المثلثية ٤ - ١	٧
١٠	جمع القوى ٥ - ١	١٠
١١	الأجسام في حالة السكون ٦ - ١	١١
١٢	الأجسام المقيدة بحبال أو أسلاك ٧ - ١	١٢
١٤	الشرط الأول للتوازن ٨ - ١	١٤
١٥	حل المسائل في علم الاستاتيكا ٩ - ١	١٥
١٨	ملخص ١٨	١٨
١٨	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية ١٨	١٨
١٩	مصطلحات وعبارات هامة ١٩	١٩
١٩	اسئلة وتخمينات ١٩	١٩
٢٥	٢ - الحركة بعجلة منتظمة	٢٥
٢٦	السرعة ومعدل الحركة ١ - ٢	٢٦
٢٧	السرعة اللحظية ومعدل الحركة اللحظي ٢ - ٢	٢٧
٣٢	تحويل الوحدات ٣ - ٢	٣٢
٣٤	التسارع (العجلة) ٤ - ٢	٣٤
٣٥	الحركة منتظمة التسارع - الحركة بعجلة منتظمة ٥ - ٢	٣٥
٣٧	معادلتان مشتقتان للحركة بعجلة منتظمة ٦ - ٢	٣٧
٤٠	ملحوظة حول المعادلات ٧ - ٢	٤٠
٤١	اكتشاف جاليليو ٨ - ٢	٤١
٤٢	السقوط الطليق وتسارع الجاذبية ٩ - ٢	٤٢

ملخص	٤٧
الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	٤٧
مصطلحات وعبارات هامة	٤٨
اسئلة وتخمينات	٤٨
مسائل	٤٩

٣ - القوى والحركة الخطية

١ - ٣	اكتشاف القوانين الفيزيائية	٥٤
٢ - ٣	قانون نيوتن الأول للحركة	٥٥
٣ - ٣	قانون نيوتن الثالث للحركة	٥٧
٤ - ٣	قانون نيوتن الثاني للحركة	٥٨
٥ - ٣	الوحدات القياسية للقياس	٦٢
٦ - ٣	الوحدات المشتقة	٦٣
٧ - ٣	استخدام قانون نيوتن الثاني	٦٦
٨ - ٣	قوى الاحتكاك	٧٢
٩ - ٣	السرعة النهائية	٧٥
	ملخص	٧٦
	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	٧٧
	مصطلحات وعبارات هامة	٧٧
	اسئلة وتخمينات	٧٨
	مسائل	٧٩

٤ - الحركة تحت تأثير الجاذبية الأرضية

١ - ٤	قانون نيوتن للجاذبية	٨٤
٢ - ٤	الحركة على مستوى مائل	٨٨
٣ - ٤	حركة المقذوفات	٩٤
	اكتشاف الأشعة السينية	٩٥
	ملخص	٩٨
	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	٩٨
	مصطلحات وعبارات هامة	٩٩
	اسئلة وتخمينات	٩٩
	مسائل	١٠٠

٥ - الشغل والطاقة ١٠٣

١٠٤	تعريف الشغل	١ - ٥
١٠٨	القدرة	٢ - ٥
١٠٩	طاقة الحركة	٣ - ٥
١١٢	طاقة الوضع	٤ - ٥
١١٤	قوة الجذب هي قوة احتفاظية	٥ - ٥
١١٥	التحول المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الوضع	٦ - ٥
١٢٢	بقاء الطاقة	٧ - ٥
١٢٤	مصدر طاقة الأرض	٨ - ٥
١٢٦	المكنات	٩ - ٥
١٢٦	مكنة الصندوق الاسود	١٠ - ٥
١٢٨	البكرة البسيطة	١١ - ٥
١٢٩	أجهزة أخرى من البكرات	١٢ - ٥
١٣٠	العجلة ومحور العجلة	١٣ - ٥
١٣٠	ملخص	
١٣١	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
١٣١	مصطلحات وعبارات هامة	
١٣٢	أسئلة وتخمينات	
١٣٣	مسائل	

٦ - كمية التحرك وضغط الغازات ١٣٧

١٣٨	مفهوم كمية التحرك	١ - ٦
١٣٨	قانون نيوتن الثانى مصاغاً مرة أخرى	٢ - ٦
١٤٠	بقاء كمية التحرك	٣ - ٦
١٤٣	التصادم المرن وغير المرن	٤ - ٦
١٤٧	النسبية	
١٤٩	الدفع النفسى والصاروخى	٥ - ٦
١٥٠	ضغط الغاز المثالى	٦ - ٦
١٥٤	ملخص	
١٥٥	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
١٥٥	مصطلحات وعبارات هامة	
١٥٦	أسئلة وتخمينات	
١٥٧	مسائل	

٧ - الحركة الزاوية والقوة الجاذبة المركزية ١٦١

١٦٢	..... البعد الزاوى θ	١ - ٧
١٦٣	..... السرعة الزاوية	٢ - ٧
١٦٤	..... التسارع الزاوى α	٣ - ٧
١٦٥	..... معادلات الحركة الزاوية	٤ - ٧
١٦٦	..... الكميات المماسية	٥ - ٧
١٦٩	..... الكميات النصف قطرية (الشعاعية) والقوة الجاذبة المركزية	٦ - ٧
١٧٣	..... القوة الطاردة المركزية	٧ - ٧
١٧٤	..... اعتقاد خاطئ شائع	٨ - ٧
١٧٥	..... انعدام الوزن	٩ - ٧
١٧٨	..... ملخص	
١٧٩	..... الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
١٧٩	..... مصطلحات وعبارات هامة	
١٨٠	..... اسئلة وتخمينات	
١٨١	..... مسائل	

٨ - دوران الأجسام الجاسئة ١٨٥

١٨٦	..... مركز الثقل ومركز الكتلة	١ - ٨
١٨٧	..... عزم الدوران والشرط الثانى للتوازن	٢ - ٨
١٩١	..... توازن الأجسام الجاسئة	٣ - ٨
١٩٢	..... موضع المحور اختيارى	٤ - ٨
١٩٩	..... التوازن المستقر والمتعادل وغير المستقر	٥ - ٨
٢٠٠	..... تشابهات أخرى بين الحركة الخطية والحركة الدورانية	٦ - ٨
٢٠١	..... العلاقة بين عزم الدوران والتسارع الزاوى	٧ - ٨
٢٠٥	..... عزم القصور الذاتى لبعض الأجسام	٨ - ٨
٢٠٨	..... طاقة الحركة الدورانية	٩ - ٨
٢١١	..... بقاء كمية التحرك الزاوى	١٠ - ٨
٢١٥	..... ملخص	
٢١٥	..... الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٢١٦	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٢١٦	..... اسئلة وتخمينات	
٢١٨	..... مسائل	

٢٢٣	..... الخواص الميكانيكية للمادة	٩ - ١
٢٢٤	..... الحالات الثلاث للمادة	٩ - ١
٢٢٥	..... الجوامد البلورية والزجاجية	٩ - ٢
٢٢٦	..... الكثافة والوزن النوعي	٩ - ٣
٢٢٨	..... قانون هوك	٩ - ٤
٢٢٩	..... الاجهاد والانفعال	٩ - ٥
٢٣٠	..... مفهوم العامل	٩ - ٦
٢٣٢	..... الضغط في مائع	٩ - ٧
٢٣٥	..... خواص الضغط في الموائع	٩ - ٨
٢٣٧	..... نظرية أرشميدس	٩ - ٩
٢٤٠	..... تعيين الكثافة	٩ - ١٠
٢٤٢	..... البارومتر (مقياس الضغط)	٩ - ١١
٢٤٥	..... الموائع المتحركة	٩ - ١٢
٢٤٦	..... اللزوجة	٩ - ١٣
٢٤٧	..... قانون بوازيل	٩ - ١٤
٢٥٠	..... معادلة برنولي للسوائل المتحركة	٩ - ١٥
٢٥١	..... نظرية توريشيللي	٩ - ١٦
٢٥٢	..... تطبيقات أخرى لمعادلة برنولي	٩ - ١٧
٢٥٣	..... قياس ضغط الدم	٩ - ١٨
٢٥٥	..... ملخص	
٢٥٦	..... الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٢٥٦	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٢٥٧	..... أسئلة وتمارين	
٢٥٨	..... مسائل	

١٠ - درجة الحرارة والحركة وقانون الغاز

٢٦٣	..... الآراء السابقة عن كنه الحرارة	١٠ - ١
٢٦٤	..... الترمومترات	١٠ - ٢
٢٦٥	..... قانون الغاز	١٠ - ٣
٢٦٨	..... الجزئ الجرامى (مول) وعدد أفوجادرو	١٠ - ٤
٢٧٠	..... ثابت قانون الغاز	١٠ - ٥
٢٧١	..... الأساس الجزئى لقانون الغاز	١٠ - ٦
٢٧٢	..... استخدام قانون الغاز	١٠ - ٧

٢٧٩	تغير السرعات الجزيئية في الغازات	٨ - ١٠
٢٨٠	الحركة البروانية	٩ - ١٠
٢٨١	الضغط الاوزموزى	١٠ - ١٠
٢٨٥	ملخص	
٢٨٦	الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٢٨٧	مصطلحات وعبارات هامة	
٢٨٧	اسئلة وتخمينات	
٢٨٨	مسائل	

١١ - الخواص الحرارية للمادة

٢٩١	الطاقة الحرارية والطاقة الداخلية	١ - ١١
٢٩٢	وحدات الطاقة الحرارية	٢ - ١١
٢٩٤	السعة الحرارية النوعية	٣ - ١١
٢٩٧	C_p و C_v للغازات	٤ - ١١
٢٩٨	حرارة التبخر وغليان السوائل	٥ - ١١
٢٩٩	الكمية $C_p - C_v$ للغاز المثالى	
٣٠٣	حرارة الانصهار والصر	٦ - ١١
٣٠٤	قياس كمية الحرارة (الكالوري مترية)	٧ - ١١
٣٠٧	التمدد الحرارى	٨ - ١١
٣١١	انتقال الحرارة : التوصيل	٩ - ١١
٣١٣	انتقال الحرارة : الحمل	١٠ - ١١
٣١٤	انتقال الحرارة : الاشعاع	١١ - ١١
٣١٥	قوانين التبريد	١٢ - ١١
٣١٥	الرطوبة	١٣ - ١١
٣١٨	ملخص	
٣١٩	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٣١٩	مصطلحات وعبارات هامة	
٣٢٠	اسئلة وتخمينات	
٣٢١	مسائل	

١٢ - الديناميكا الحرارية

٣٢٥	متغيرات الحالة	١ - ١٢
٣٢٦	القانون الأول للديناميكا الحرارية	٢ - ١٢

٣٢٩	الشغل المبذول أثناء تغير الحجم	٣ - ١٢
٣٣٢	العمليات المألوفة في الغازات	٤ - ١٢
٣٣٧	العمليات الدورية وتحول الطاقة	٥ - ١٢
٣٣٩	كفاءة المحرك (أو الآلة)	٦ - ١٢
٣٤٢	المضخات الحرارية والمبردات	٧ - ١٢
٣٤٤	القانون الثانى للديناميكا الحرارية	٨ - ١٢
٣٤٥	النظام مقابل عدم النظام (الفوضى)	٩ - ١٢
٣٤٩	الانثروبيا	١٠ - ١٢
٣٥١	الموت الحرارى للكون	١١ - ١٢
٣٥٣	ملخص	
٣٥٥	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٣٥٥	مصطلحات وعبارات هامة	
٣٥٦	اسئلة وتخمينات	
٣٥٧	مسائل	

١٣ - الحركة الاهتزازية

٣٦٠	الانظمة المهتزة	١ - ١٣
٣٦١	الزنبرك المهتز	٢ - ١٣
٣٦٢	الحركة التوافقية البسيطة	٣ - ١٣
٣٦٥	زمن الاهتزازة	٤ - ١٣
٣٦٨	الاهتزاز الجيبى : الحركة التوافقية البسيطة	٥ - ١٣
٣٦٩	البندول البسيط	٦ - ١٣
٣٧٠	الاهتزازات القسرية	٧ - ١٣
٣٧٢	ملخص	
٣٧٢	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٣٧٢	مصطلحات وعبارات هامة	
٣٧٣	اسئلة وتخمينات	
٣٧٤	مسائل	

١٤ - الحركة الموجية

٣٧٨	أهمية الحركة الموجية	١ - ١٤
٣٧٩	موجات الأوتار : الموجات المستعرضة	٢ - ١٤
٣٨٢	انعكاس الموجه	٣ - ١٤

٣٨٥	الرنين	٤ - ١٤
٣٨٦	الحركة الرنينية لوتر : الموجات المستقرة (أو الواقفة)	٥ - ١٤
٣٨٩	موجات مستعرضة أخرى	٦ - ١٤
٣٩١	الموجات الطولية	٧ - ١٤
٣٩٢	الموجات التضاغطية المستقرة على زنبرك	٨ - ١٤
٣٩٤	الموجات التضاغطية على قضيب	٩ - ١٤
٣٩٥	ملخص	
٣٩٦	الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٣٩٦	مصطلحات وعبارات هامة	
٣٩٦	اسئلة وتخمينات	
٣٩٧	مسائل	

٣٩٩	١٥ - الصوت
٤٠٠	١ - ١٥ منشأ الصوت
٤٠٠	٢ - ١٥ الموجات الصوتية في الهواء
٤٠٢	٣ - ١٥ سرعة الصوت
٤٠٢	٤ - ١٥ شدة وجهارة الأصوات
٤٠٤	٥ - ١٥ الاستجابة الترددية للاذن
٤٠٥	٦ - ١٥ درجة ونوع الصوت
٤٠٨	٧ - ١٥ تداخل الموجات الصوتية
٤١٢	٨ - ١٥ الضربات
٤١٣	٩ - ١٥ أنابيب الارغن والاعمدة الهوائية المهتزة
٤١٥	١٠ - ١٥ السلام الموسيقية والتركيبات التوافقية (أو الهارمونية)
٤١٧	١١ - ١٥ ظاهرة دوبلر
٤٢٠	١٢ - ١٥ الموجات الصدمية ودوى اختراق جدار الصوت
٤٢٢	ملخص
٤٢٢	الحد الأدنى من الاهداف التعليمية
٤٢٣	مصطلحات وعبارات هامة
٤٢٣	اسئلة وتخمينات
٤٢٤	مسائل

١٦ - الشحنات الكهربائية الساكنة . الكهربائية الاستاتيكية ٤٢٧

٤٢٨	الذرات كمصادر للشحنة	١ - ١٦
٤٢٩	القوى بين الشحنات	٢ - ١٦
٤٢٩	العوازل والموصلات	٣ - ١٦
٤٣٠	المكشاف الكهربائي (الالكتروسكوب)	٤ - ١٦
٤٣١	الشحن بالتوصيل وبالحث	٥ - ١٦
٤٣٢	تجربة دولو الثلج لفارادى	٦ - ١٦
٤٣٤	قانون كولوم	٧ - ١٦
٤٣٨	المجال الكهربائي	٨ - ١٦
٤٤١	المجال الكهربائي في أنظمة مختلفة	٩ - ١٦
٤٤٣	طاقة الوضع الكهربائية : فرق الجهد	١٠ - ١٦
٤٤٦	الجهود المطلقة	١١ - ١٦
٤٤٩	ملخص	
٤٥٠	الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٤٥٠	مصطلحات وعبارات هامة	
٤٥١	اسئلة وتخمينات	
٤٥٢	مسائل	

١٧ - عناصر الدائرة وسلوكها ٤٥٥

٤٥٦	البطاريات كمصدر لفرق الجهد	١ - ١٧
٤٥٧	حركة الشحنة في مجال كهربائي	٢ - ١٧
٤٦٠	الالكترودون - فولت كوحدة للطاقة	٣ - ١٧
٤٦١	التيار الكهربائي	٤ - ١٧
٤٦٣	دائرة كهربائية بسيطة	٥ - ١٧
٤٦٥	قانون أوم	٦ - ١٧
٤٦٧	وضع أجهزة القياس في الدائرة	٧ - ١٧
٤٦٨	المقاومية واعتمادها على درجة الحرارة	٨ - ١٧
٤٧١	المكثفات	٩ - ١٧
٤٧٢	مفرطات الموصلية	
٤٧٥	العوازل	١٠ - ١٧
٤٧٨	الطاقة المخزنة في مكثف	١١ - ١٧
٤٧٩	الطاقة المخزنة في مجال كهربائي	١٢ - ١٧
٤٨٠	ملخص	

٤٨١	الحد الأدنى من الاهداف التعليمية
٤٨٢	مصطلحات وعبارات هامة
٤٨٢	اسئلة وتخمينات
٤٨٣	مسائل

١٨ - دوائر التيار المستمر

٤٨٥	قاعدة النقطة لكيرتشوف	١ - ١٨
٤٨٦	قاعدة العروة (أو الدائرة) لكيرتشوف	٢ - ١٨
٤٨٧	المقاومات على التوالي وعلى التوازي	٣ - ١٨
٤٩١	المكثفات على التوالي وعلى التوازي	٤ - ١٨
٤٩٥	حل مسائل الدوائر	٥ - ١٨
٤٩٥	تجربة قطرة الزيت لميليكان	
٤٩٧	القدرة والتسخين الكهربائي	٦ - ١٨
٥٠١	الدوائر المنزلية	٧ - ١٨
٥٠٣	الامان الكهربائي	٨ - ١٨
٥٠٥	ق.د.ك. والجهد الطرفي لبطارية	٩ - ١٨
٥٠٦	مقياس الجهد	١٠ - ١٨
٥٠٨	ملخص	
٥١٠	الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٥١١	مصطلحات وعبارات هامة	
٥١١	اسئلة وتخمينات	
٥١٢	مسائل	

١٩ - المغناطيسية

٥١٧	تخطيط المجالات المغناطيسية	١ - ١٩
٥١٨	المجالات المغناطيسية للتيارات	٢ - ١٩
٥١٩	القوة المؤثرة على تيار في مجال مغناطيسي	٣ - ١٩
٥٢٠	امتداد لقاعدة اليد اليمنى	٤ - ١٩
٥٢٢	القوى المؤثرة على شحنات متحركة	٥ - ١٩
٥٢٣	تعيين e/m	٦ - ١٩
٥٢٦	المجال المغناطيسي للأرض	٧ - ١٩
٥٢٨	خطوط التدفق وكثافة التدفق	٨ - ١٩
٥٢٨	قانون أمبير وحساب B	٩ - ١٩

٥٣٣	..... المجال المغناطيسى لعروة دائرية	١٠ - ١٩
٥٣٤	..... الملف اللولبى	١١ - ١٩
٥٣٦	..... الملف الحلقى	١٢ - ١٩
٥٣٧	..... نظرية امبير للمغناطيسات	١٣ - ١٩
٥٤١	..... منحنى B مقابل H	١٤ - ١٩
٥٤٤	..... منحنى التخلفية	١٥ - ١٩
٥٤٥	..... ملخص	
٥٤٥	..... الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٥٤٦	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٥٤٦	..... اسئلة وتخمينات	
٥٤٧	..... مسائل	

٢٠ - الاجهزة الميكانيكية الكهربائية

٥٥١	..... الجلفانومتر	١ - ٢٠
٥٥٢	..... الاميترات	٢ - ٢٠
٥٥٣	..... الفولتميترات	٣ - ٢٠
٥٥٤	..... عزم الى على عروة تيار	٤ - ٢٠
٥٥٩	..... ق.د.ك. المنتج بالحث	٥ - ٢٠
٥٦٣	..... المحاثات المتبادلة	٦ - ٢٠
٥٦٤	..... المحاثات الذاتية	٧ - ٢٠
٥٦٥	..... ق.د.ك. الحركية	٨ - ٢٠
٥٦٧	..... مولد التيار المتردد	٩ - ٢٠
٥٧٢	..... المحركات	١٠ - ٢٠
٥٧٤	..... ملخص	
٥٧٤	..... الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٥٧٥	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٥٧٥	..... اسئلة وتخمينات	
٥٧٦	..... مسائل	

٢١ - التيارات المترددة والدوائر المفاعلة

٥٨٠	..... شحن وتفريغ مكثف	١ - ٢١
٥٨١	..... مقادير التيار المتردد ، قيم جذر متوسط المربعات (RMS)	٢ - ٢١
٥٨٣	..... دائرة المقاومة	٣ - ٢١

٥٨٤	..... دائرة السعة	٤ - ٢١
٥٨٧	..... دائرة المحاثة	٥ - ٢١
٥٨٩	..... دائرة LCR مجتمعة	٦ - ٢١
٥٩١	..... الرنين الكهربائي	٧ - ٢١
٥٩٤	..... المحول ونقل القدرة	٨ - ٢١
٥٩٧	..... ملخص	
٥٩٧	..... الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٥٩٨	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٥٩٨	..... اسئلة وتخمينات	
٦٠٠	..... مسائل	

٢٢ - الالكترنيات والأمواج الكهرومغناطيسية

٦٠٣	.....
٦٠٤	..... الابتعاث الترميوني	١ - ٢٢
٦٠٥	..... الصمام الثنائي والتقويم	٢ - ٢٢
٦٠٧	..... الصمام الثنائي شبه الموصل	٣ - ٢٢
٦١١	..... تطبيقات النيبطات الالكترونية	٤ - ٢٢
٦١٣	..... توليد أمواج اللاسلكى	٥ - ٢٢
٦١٨	..... طيف الأمواج الكهرومغناطيسية	٦ - ٢٢
٦١٩	..... استقبال الامواج اللاسلكية	٧ - ٢٢
٦٢١	..... العلاقة بين E و B فى الأمواج الكهرومغناطيسية	٨ - ٢٢
٦٢٤	..... المجالات المغناطيسية المستحثة بتغيير المجالات الكهربائية	٩ - ٢٢
٦٢٦	..... سرعة الامواج الكهرومغناطيسية	١٠ - ٢٢
٦٣١	..... تعريف الوحدات الكهربائية	١١ - ٢٢
٦٣٣	..... ملخص	
٦٣٣	..... الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٦٣٤	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٦٣٤	..... اسئلة وتخمينات	
٦٣٥	..... مسائل	

٢٣ - خواص الضوء

٦٣٧	.....
٦٣٨	..... مفهوم الضوء	١ - ٢٣
٦٤٠	..... سرعة الضوء	٢ - ٢٣
٦٤١	..... انعكاس الضوء	٣ - ٢٣

٦٤٣	..... انكسار الضوء : قانون سنل	٤ - ٢٣
٦٤٦	..... الانعكاس الكلى الداخلى	٥ - ٢٣
٦٤٨	..... المرآة المستوية	٦ - ٢٣
٦٥٠	..... بؤرة مرآة كروية مقعرة	٧ - ٢٣
٦٥٢	..... الأشعة المنعكسة الثلاثة وتكوين الصورة	٨ - ٢٣
٦٥٤	..... معادلة المرآة	٩ - ٢٣
٦٥٧	..... المرايا المحدبة	١٠ - ٢٣
٦٦٠	..... النقط البؤرية لعدسة	١١ - ٢٣
٦٦٢	..... رسم مسار الأشعة للعدسات الرقيقة	١٢ - ٢٣
٦٦٤	..... معادلة العدسة الرقيقة	١٣ - ٢٣
٦٦٦	..... مجموعات العدسات	١٤ - ٢٣
٦٦٨	..... ملخص	
٦٦٩	..... الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٦٦٩	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٦٧٠	..... اسئلة وتخمينات	
٦٧٠	..... مسائل	

٢٤ - النيطات الضوئية

٦٧٣	..... العين	١ - ٢٤
٦٧٤	..... آلة التصوير البسيطة	٢ - ٢٤
٦٧٧	..... مجموعات العدسات المتقاربة : وحدة الديوبتر	٣ - ٢٤
٦٧٩	..... العدسة المكبرة (المكبر البسيط)	٤ - ٢٤
٦٨٠	..... الميكروسكوب (المجهر)	٥ - ٢٤
٦٨٣	..... التلسكوب (المقراب) الفلكى	٦ - ٢٤
٦٨٤	..... التلسكوب (المقراب) الأرضى	٧ - ٢٤
٦٨٦	..... الاسبيكتروسكوب (المطياف) المنشورى	٨ - ٢٤
٦٨٧	..... علم الفلك الاشعاعى	
٦٨٩	..... الضوء المستقطب	٩ - ٢٤
٦٩٣	..... ملخص	
٦٩٤	..... الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٦٩٤	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٦٩٥	..... اسئلة وتخمينات	
٦٩٦	..... مسائل	

٢٥ - التداخل والحيود ٦٩٩

٧٠٠	الحيود	١ - ٢٥
٧٠٠	تداخل الموجات	٢ - ٢٥
٧٠٣	تجربة الشق المزدوج ليونج	٣ - ٢٥
٧٠٧	انماط التداخل	٤ - ٢٥
٧٠٩	مقياس التداخل لمايكلسون	٥ - ٢٥
٧١٠	التداخل الناتج من الأغشية الرقيقة	٦ - ٢٥
٧١٣	محزوز الحيود	٧ - ٢٥
٧١٧	الحيود بواسطة شق أحادي	٨ - ٢٥
٧١٩	الحيود وحدود التحليل	٩ - ٢٥
٧٢١	حيود أشعة أكس بواسطة البلورات	١٠ - ٢٥
٧٢٤	ملخص	
٧٢٤	الحد الأدنى من الأهداف التعليمية	
٧٢٥	مصطلحات وعبارات هامة	
٧٢٥	أسئلة وتخمينات	
٧٢٦	مسائل	

٢٦ - مولد الفيزياء الحديثة ٧٢٩

٧٣٠	اكتشاف بلانك	١ - ٢٦
٧٣٣	استعمال اينشتين لمفهوم بلانك	٢ - ٢٦
٧٣٨	ظاهرة كومبتون	٣ - ٢٦
٧٣٩	فروض النسبية	٤ - ٢٦
٧٤١	c هي الحد الأعلى للسرعة	٥ - ٢٦
٧٤٢	التزامن	٦ - ٢٦
٧٤٤	الساعات المتحركة تكون أبطأ في حركتها	٧ - ٢٦
٧٤٨	الانكماش النسبي للطول	٨ - ٢٦
٧٥٠	العلاقة النسبية بين الكتلة والطاقة	٩ - ٢٦
٧٥٢	كمية تحرك الفوتون	١٠ - ٢٦
٧٥٣	موجات الجسيمات	١١ - ٢٦
٧٥٦	مبدأ عدم اليقين	١٢ - ٢٦
٧٥٨	ميكانيكا الكم	١٣ - ٢٦
٧٦٠	الميكروسكوب الإلكتروني	١٤ - ٢٦
٧٦٤	ملخص	

٧٦٤	.....	الحد الأدنى من الاهداف التعليمية
٧٦٥	.....	مصطلحات وعبارات هامة
٧٦٥	.....	اسئلة وتخمينات
٧٦٦	.....	مسائل
٧٧٠	.....	٢٧ - التركيب الذرى وانبعاث الضوء
٧٦٩	.....	١ - ٢٧ الذرة النووية
٧٧٢	.....	٢ - ٢٧ طيف الايدروجين
٧٧٤	.....	٣ - ٢٧ ذرة بوهر
٧٧٨	.....	٤ - ٢٧ انبعاث الضوء من ذرة بوهر
٧٨١	.....	٥ - ٢٧ الرسوم البيانية لمستويات الطاقة
٧٨٣	.....	٦ - ٢٧ امتصاص ذرة بوهر للضوء
٧٨٦	.....	٧ - ٢٧ تفسير دى برولى لمدارات بوهر
٧٨٧	.....	٨ - ٢٧ رنين الموجات فى الذرات
٧٩٢	.....	٩ - ٢٧ الاعداد الكمية ومبدأ باولى للاستبعاد
٧٩٣	.....	١٠ - ٢٧ الجدول الدورى
٧٩٥	.....	١١ - ٢٧ انتاج أشعة X
٧٩٨	.....	١٢ - ٢٧ الطيف الخطى والشريطى والمستمر
٨٠٢	.....	١٣ - ٢٧ التماسك
٨٠٤	.....	١٤ - ٢٧ الليزر
٨٠٨	.....	ملخص
٨٠٩	.....	الحد الأدنى من الاهداف التعليمية
٨٠٩	.....	مصطلحات وعبارات هامة
٨١٠	.....	اسئلة وتخمينات
٨١١	.....	مسائل
٨١٣	.....	٢٨ - النواة الذرية
٨١٤	.....	١ - ٢٨ تركيب النواة
٨١٦	.....	٢ - ٢٨ النظائر
٨١٩	.....	٣ - ٢٨ النقص الكتلى وطاقة الترابط
٨٢٢	.....	٤ - ٢٨ النشاط الاشعاعى
٨٢٥	.....	٥ - ٢٨ نواتج الانحلال والمتاليات ذات النشاط الاشعاعى
٨٢٨	.....	٦ - ٢٨ التفاعلات النووية والتحويلات
٨٢٩	.....	٧ - ٢٨ القوى النووية والاستقرار النووى

٨٣١	..... الانشطار النووي	٨ - ٢٨
٨٣٤	..... المفاعلات النووية	٩ - ٢٨
٨٣٥	..... التفاعل الاندماجي	١٠ - ٢٨
٨٣٦	..... الاشعاع : آثارة والكشف عنه	١١ - ٢٨
٨٤١	..... الجرعة الاشعاعية	١٢ - ٢٨
٨٤٣	..... الالتلاف الاشعاعي	١٣ - ٢٨
٨٤٥	..... الجسيمات الأساسية	١٤ - ٢٨
٨٤٧	..... ملخص	
٨٤٨	..... الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٨٤٩	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٨٤٩	..... اسئلة وتخمينات	
٨٥٠	..... مسائل	

٢٩ - فيزياء الكون

٨٥٤	..... الشهاب الأولى المتوهمج	١ - ٢٩
٨٥٦	..... المجرات والنجوم	٢ - ٢٩
٨٥٨	..... التطور النجمي	٣ - ٢٩
٨٦٠	..... درجة حرارة الفضاء	
٨٦٢	..... الكون المتعدد	٤ - ٢٩
٨٦٤	..... تحديد العمر من النشاط الاشعاعي	٥ - ٢٩
٨٦٥	..... أصل الأرض	٦ - ٢٩
٨٦٨	..... نهاية البداية	٧ - ٢٩
٨٧٠	..... ملخص	
٨٧٠	..... الحد الأدنى من الاهداف التعليمية	
٨٧١	..... مصطلحات وعبارات هامة	
٨٧٣	..... اسئلة وتخمينات	

٨٧٣ ملاحق

٨٧٣	..... تحويل الوحدات	- ١
٨٧٤	..... قوى العدد « ١٠ »	- ٢
٨٧٥	..... الجدول الدوري للعناصر	- ٣
٨٧٦	..... جدول مختصر للنظائر	- ٤
٨٧٩	..... الدوال المثلثية	- ٥
٨٨٠	..... الاجوبة	- ٦

٨٨٧ قائمة المصطلحات العلمية

٩٢٥ الفهرس	
-----	--------------	--

مقدمة

منحنا الأقبال الواسع على الطبعات السابقة من كتاب « اساسيات الفيزياء » موارد قيمة ممثلة في الانتقادات البناءة التي وافانا بها كثير من مستعمليه . وعند اعداد هذه الطبعة طلبنا من أعضاء هيئة التدريس والطلاب أن يتكرموا بتقديم اقتراحاتهم وتعليقاتهم على الطبعة السابقة ، مما ساعدنا على اجراء كثير من التغييرات فيها بالرغم من أن الملاحح الاساسية للطبعة السابقة قد تم الاحتفاظ بها في الطبعة الحالية . ويمكن تلخيص أهم التغييرات فيما يلي .

اعيد فحص جميع المسائل وعدلت المسائل السابقة عند الضرورة ، وأضيف كثير من المسائل الجديدة ، كما تعالج كثير من المسائل الجديدة الموضوعات الهامة لطلاب العلوم البيولوجية . تنقسم المسائل حسب درجة صعوبتها إلى ثلاثة أقسام : مسائل عادية ومتوسطة الصعوبة وصعبة . وحتى يزداد اعتياد الطلاب على النظام المتري للوحدات فقد تَجَنَّبْنَا التركيز على النظام البريطاني للوحدات اذ إستعمل فقط في الاجزاء الأولى من الكتاب حتى يعتاد الطلاب تدريجيا على العمل في الفيزياء .

أعيد كتابة كثير من الاجزاء والفصول لزيادة توضيحها ولاستشارة عنصر التشويق لدى الطلاب . وبالرغم من أن هذه التغييرات واسعة جدا لدرجة يستحيل معها الاشارة لها جميعا هنا ، فمن الضروري أن نذكر ثلاثة منها : (١) يفضل بعض المدرسين مناقشة الاستاتيكا في مرحلة مبكرة من المقرر التعليمي ويفضل البعض الآخر ارجاء معالجة الاجسام الجاسئة إلى مرحلة متأخرة . ولكن من الممكن استخدام كلا المدخلين في هذا الكتاب ، إذ نوقش موضوع الاستاتيكا في القسم الاول من الفصل التاسع ، ولكن هذا الموضوع وكذلك مادة القسم الاخير من هذا الفصل والمرتبطة به قد صيغت بحيث يمكن وصفها في القسم الاخير من الفصل الأول إذا اريد ذلك (٢) زيدت المادة المتعلقة بموضوع الديناميكا الحرارية ، ووضعت في فصل مستقل جديد . (٣) بالرغم من أن النسبية قد نوقشت باختصار في مرحلة مبكرة من متن الكتاب فإن الجزء الاساسي من هذا الموضوع قد كتب من جديد ورحل الى الفصل السادس والعشرين . ويمكن للقارئ ملاحظة كثير من التغييرات المفيدة الأخرى عند مقارنة الطبعتين الثانية والثالثة .

كذلك فإن الفعالية التعليمية لمن هذا الكتاب قد طورت بطرق مختلفة ، إذ وضعت في نهاية كل فصل قائمة بالحد الأدنى من الاهداف التعليمية وملخص ومجموعة من المصطلحات والعبارات الهامة ، كما احتفظ بالاسئلة والتخمينات الشائعة المتعلقة بموضوع الفصل . ويعتبر الاسلوب المستخدم في الكتاب لجذب الانتباه إلى الجمل والعبارات الهامة ميزة جديدة ، فهي في الواقع تؤدي العمل الروتيني في وضع الخطوط تحت الكلمات والعبارات الهامة وهي الطريقة التي

يستخدمها كثير من الطلاب المجددين بنجاح كبير . والآن فإن الطلاب ، وخاصة غير الماهرين منهم في تحديد المفاهيم الهامة ، قد زودوا بهذه الوسيلة التعليمية القيمة .

لقد ساهم كثير من أعضاء هيئة التدريس والطلاب باقتراحاتهم في هذه الطبعة الجديدة ، وأنا مدين لهم بالشكر والعرفان . كما شارك ثلاثة بمقالات نقدية مفصلة وافية وهم الاساتذة جيرارد ف . لاتيز ومارلو ر . مارتين وجورج و . باركر ، والى اقدر مساعدتهم عظيم التقدير . وأنا أرحب بالاقتراحات التي يمكن للقارئ تقديمها لمزيد من تحسين هذا الكتاب . كذلك فأني أقدم جزيل شكرى الى زوجتى فيليس لمساعدتها في اعداد مخطوط الكتاب .

ف.بوش

الفصل الأول

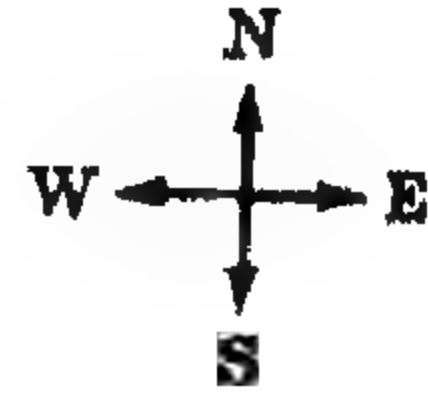
المتجهات والقوى المتزنة

يمثل وصف وتفسير الظواهر الفيزيائية القسم الأعظم من علم الفيزياء.. ولايجاد العلاقة المتبادلة بين الملاحظات التجريبية المتعلقة بالكون الفيزيائي وفهمها واستخدامها من الضروري أن نتعامل مع بعض المفاهيم مثل القوة والحركة والازاحة . وتنتمى هذه المفاهيم ، وكذلك كثير من المفاهيم التي سنقابلها فيما بعد ، الى مجموعة من الكميات المسماة بالمتجهات . هذه الكميات يمكن وضعها بطريقة مناسبة تماما باستخدام أسهم خاصة . سنتعرف في هذا الفصل على طبيعة الكميات الموجهة وكيفية استخدامها ، وسنرى أن مفهوم القوة الموجهة هو أداة مناسبة لوصف المواقف التي تترن فيها جميع القوى .

١ - ١ المتجهات :

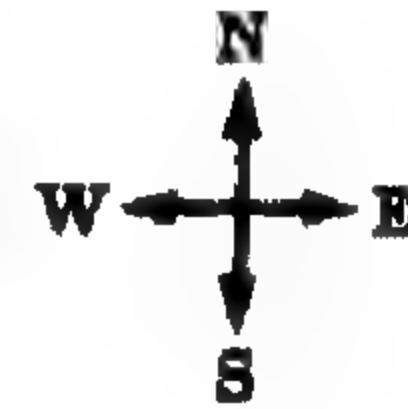
إذا أخبرت شخصا ما بأنك قد قدت سيارتك مسافة 30 mi (miles) الى الشرق فانك تتحدث بلغة المتجهات . هذا يعنى أن لازاحة سيارتك مقدار واتجاه ، ومقدارها هو 30 mi واتجاهها هو الشرق . تسمى الكميات ذات المقدار والاتجاه بالكميات المتجهة . وكما سنرى حالا فان الازاحة والقوة والسرعة هي كميات متجهة نموذجية . وهناك كثير من الكميات التي لا ترتبط بأى اتجاه وهي تسمى بالكميات غير الموجهة . فمثلا عدد البيض في علبة من الكرتون هو كمية غير موجهة لأنه لا يرتبط بأى اتجاه .

تعريف :



يمثل المتجه ازاحة قدرها 30 mi شرقا

من أهم ملامح الكميات المتجهة أنه يمكن تمثيلها بواسطة الصور . لنفرض على سبيل المثال أن سيارة ما تسير مسافة 30 mi الى الشرق ، يمكن تصوير ذلك كما هو مبين بالشكل ١ - ١ . عندئذ تمثل ازاحة السيارة وقدرها 30 mi الى الشرق بواسطة سهم يتجه نحو الشرق ، وهذا السهم يسمى متجه . يوضح اتجاه السهم (أو المتجه) أن الازاحة في اتجاه الشرق . ويختار طول السهم بحيث يتناسب مع مقدار الازاحة وهو 30 mi في هذه الحالة . فمثلا يمكن تمثيل مسافة 1 mi بمسافة قدرها 1 mm (millimeter) . وعليه فان طول السهم الذى يمثل ازاحة قدرها 30 mi سيكون 30 mm (1 mm (30) أو 30 mm . لنأخذ الآن مثال آخر :



مثال توضيحي ١ - ١ : لنفرض أنك تريد تمثيل هذه العبارة : لقد قطعت مسافة 30 Km (Kilometers) شرقا ثم 10 Km شمالا .*

شكل (١ - ٢)

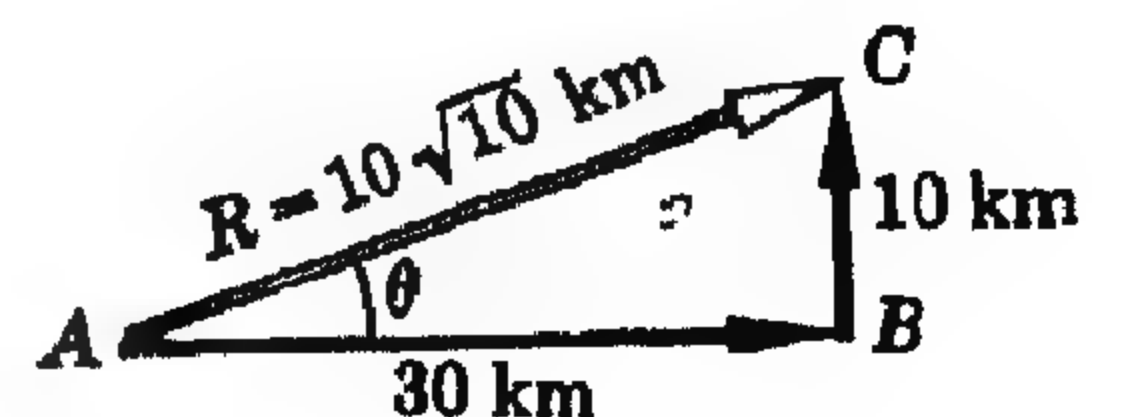
رسم بيان المتجهات لرحلة قطع فيها المسافر مسافة قدرها 30 km في اتجاه الشرق ثم 10 km في اتجاه الشمال

طريقة الحل : من الواضح هنا أن لدينا متجهين (سهمين) يمكن تمثيلهما كما بالشكل ١ - ٢ . لقد بدأت كما هو واضح من النقطة A ثم ذهبت أولا الى النقطة B ثم انتهيت عند النقطة C . من هنا يتضح أن الرسم البياني للمتجهين هو وسيلة مناسبة لتصوير الحركتين المتتاليتين .

بالاضافة الى ذلك يبين الشكل ١ - ٢ أن نقطة النهاية للرحلة لم تكن على بعد 40 km من نقطة البداية ، اذ أن المسافة الفعلية بين النقطتين A و C هي طول السهم R المبين بالشكل ١ - ٣ . تسمى المسافة الخطية المستقيمة من نقطة البداية A الى نقطة النهاية C بالازاحة ، وهي بالطبع كمية متجهة وتمثل بالسهم R الموضح بالشكل ١ - ٣ .

شكل (١ - ٣) تعريف

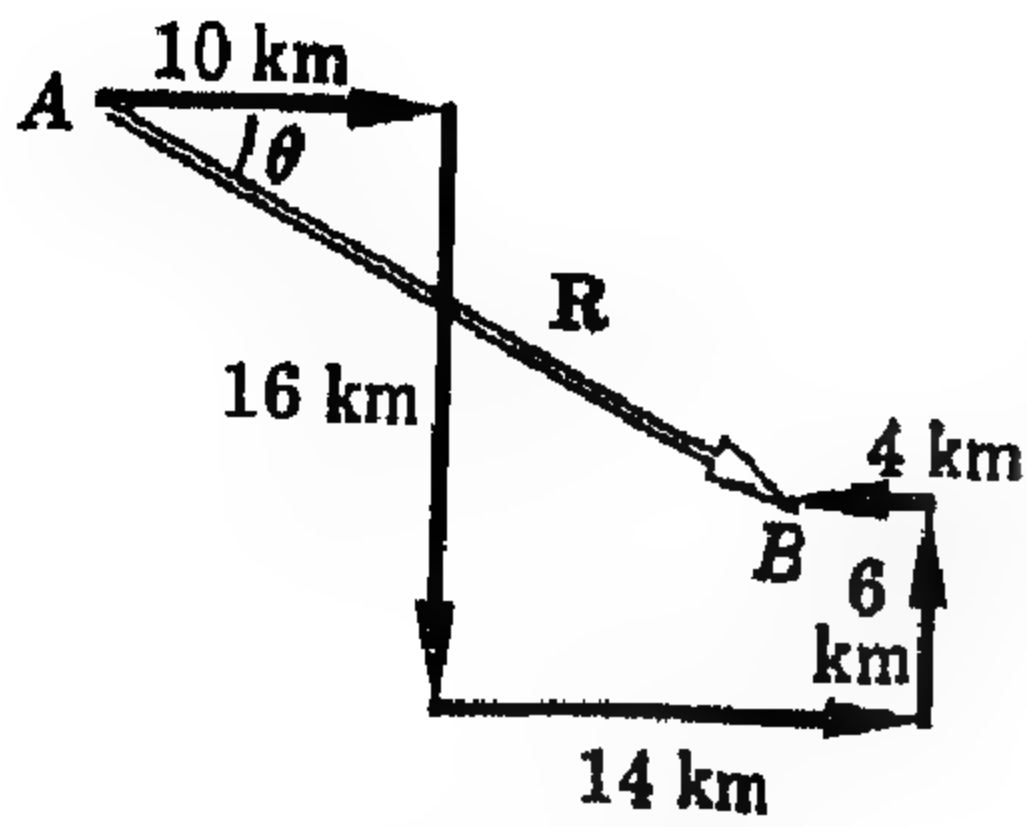
تكافئ الازاحتان 30 km شرقا ثم 10 km شمالا ازاحة محصلة قدرها $10\sqrt{10}$ في الاتجاه المبين



* 1 mm يساوى $1/32$ in . ولكي نكون أكثر دقة نعتبر ان 1 in = 25.4 mm, and 10 mm = 1.0 cm (centimeters).

* 1 Km = 1000 m ((meters) = 0.62 mi.

يمكن حساب هذه المسافة باستخدام نظرية فيثاغورث للمثلث قائم الزاوية كما يلي :



$$R = \sqrt{(10)^2 + (16)^2} \text{ km} \\ = \sqrt{100 + 256} \text{ km} = \sqrt{356} \text{ km} = 18.87 \text{ km}$$

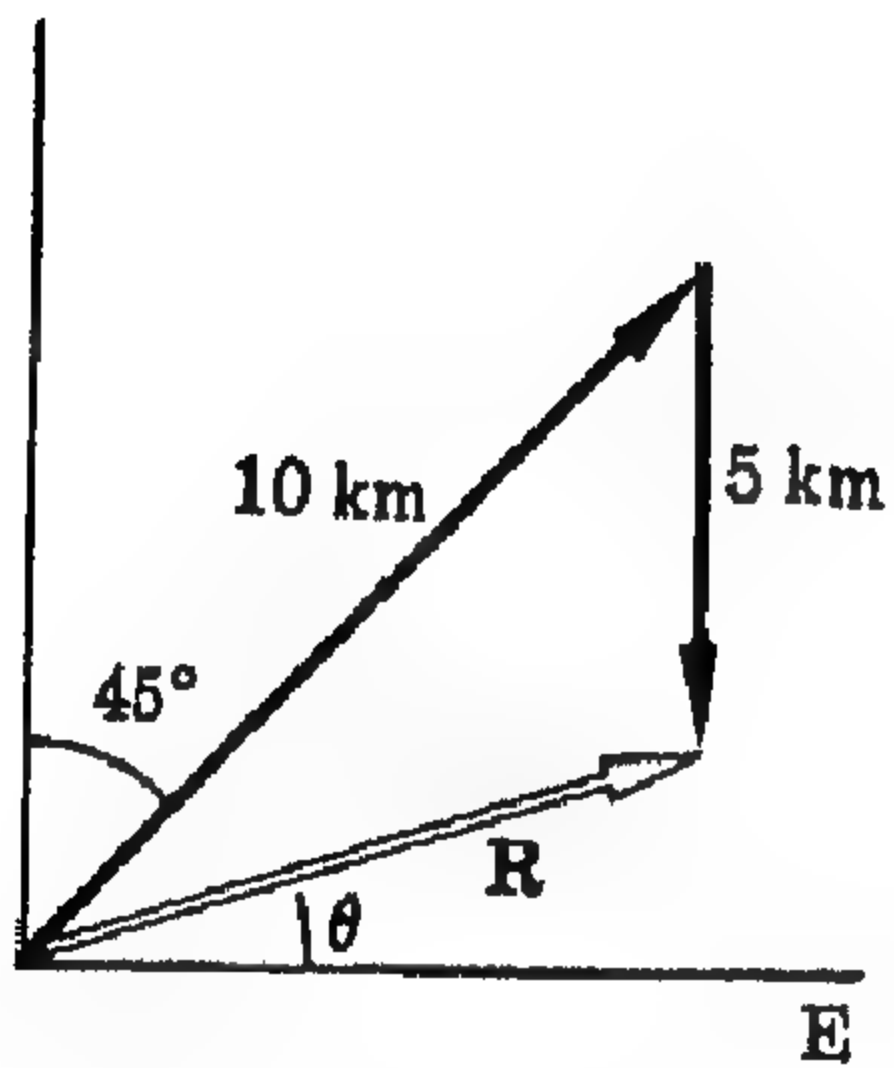
حيث تسمى المسافة الخطية المستقيمة R من نقطة البداية الى نقطة النهاية بالازاحة المحصلة .

شكل (١ - ٤)

المسار الذي تقطعه السيارة في المثال التوضيحي ١-٢ . بدأت السيارة من النقطة A وانتهت عند النقطة B .

من هذا نرى أن الازاحة المحصلة من نقطة بداية الرحلة تتحدد مقدارا واتجاها بالسهم المبين بالشكل ١ - ٣ . ويمكننا وصف الاتجاه بهذه الجملة « يميل المتجه المحصل بزاوية θ (ثيتا) في الاتجاه الشمالى الشرقى » . وإذا نفذ رسم بيان المتجهات بدقة باستخدام مقياس رسم مناسب مع الأخذ في الاعتبار أن الزاوية بين الازاحتين الموجهتين تساوى 90° تماما فان طول المحصلة يمكن أن يقاس مباشرة من هذا الرسم . عندئذ لابد أن تكون القيمة المستنتجة بهذه الطريقة مساوية لتلك القيمة التى يمكن الحصول عليها حسابيا باستخدام المعادلة (١ - ١) في حدود خطأ منسطرة القياس . ويمكن استخدام المنقلة لقياس قيمة الزاوية θ .

تسمى هذه الطريقة لإيجاد الازاحة المحصلة (مقدارا واتجاها) باستخدام المسطرة والمنقلة بالطريقة البيانية لحل المسألة ، وهى طريقة صحيحة تماما ويكون استخدامها مناسباً في كثير من الحالات . يمكننا تلخيص هذه الطريقة فيما يلي :



شكل (١ - ٥)

رسم بيان المتجهات لرحلة طولها 10 km في الاتجاه الشمالى الشرقى تليها رحلة أخرى طولها 5 km في الاتجاه الجنوبى

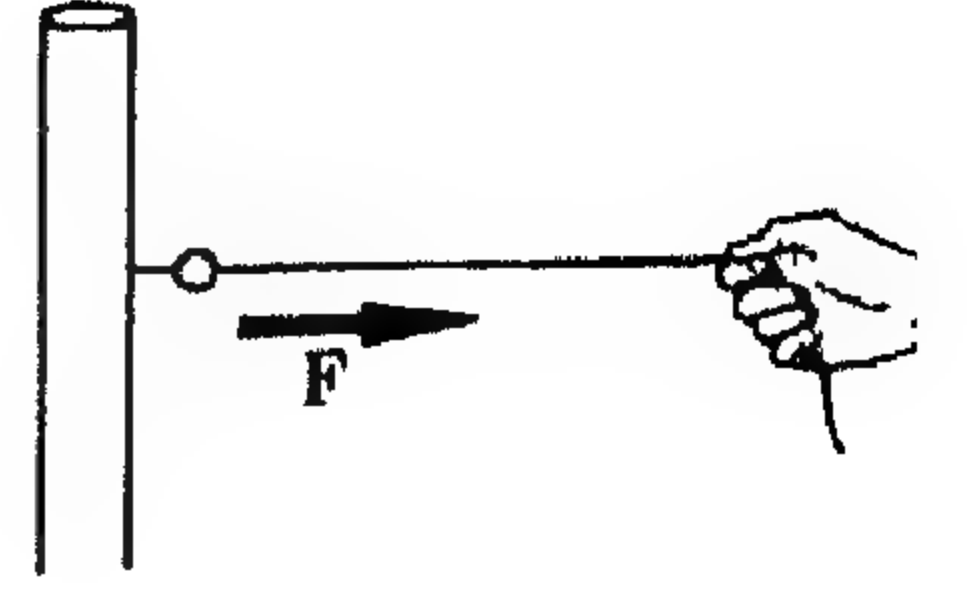
لجمع المتجهات بيانياً نرسم هذه المتجهات بحيث ينطبق ذيل المتجه الثانى مع رأس المتجه الأول وينطبق ذيل المتجه الثالث مع رأس المتجه الثانى وهكذا . عندئذ يكون المتجه المحصل هو ذلك السهم الذى يبدأ من ذيل المتجه الأول وينتهى عند رأس المتجه الأخير . لنطبق هذه الطريقة في المثال التوضيحي التالى :

مثال توضيحي ١ - ٢ : قطعت سيارة مسافة 10.0 km شرقاً ثم 16.0 km جنوباً ثم 14.0 km شرقاً ثم 6.0 km شمالاً وأخيراً 4.0 km غرباً . اوجد الازاحة المحصلة من نقطة البداية .

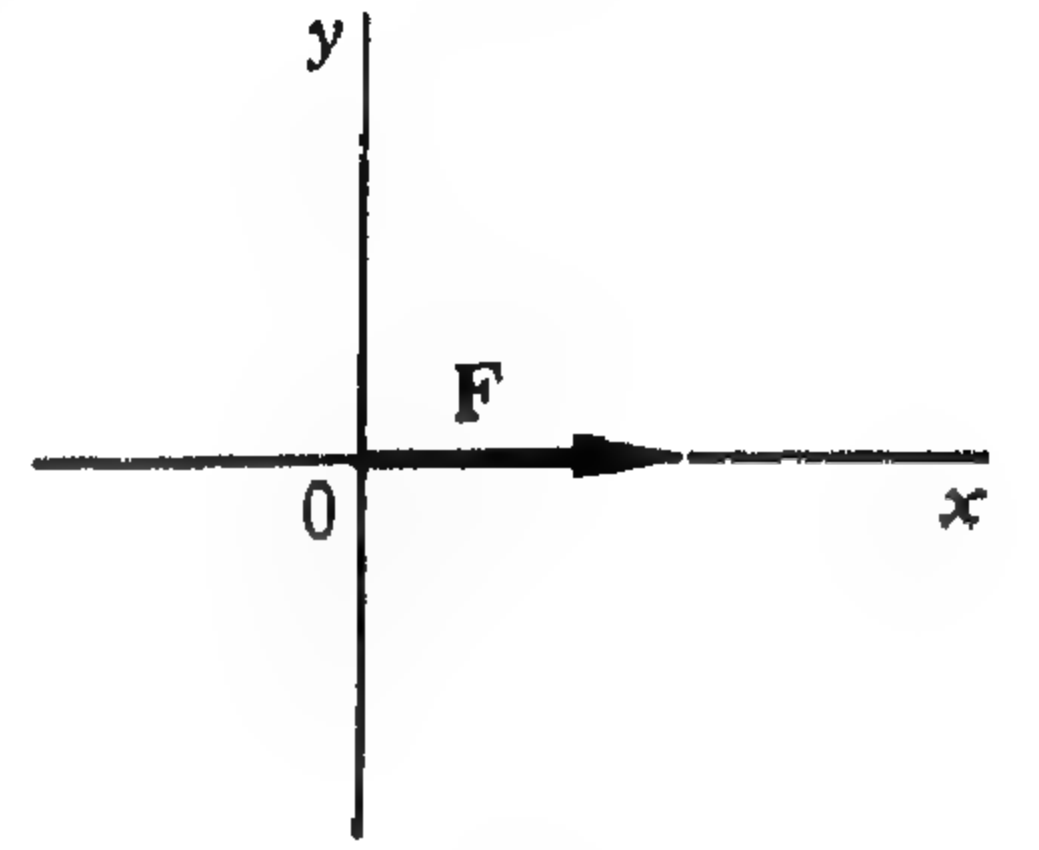
طريقة الحل : يمثل شكل ١ - ٤ رسم بيان المتجهات في هذه الحالة . ومرة ثانية تعطى الازاحة المحصلة تماماً بالسهم المبين بالشكل . فإذا استخدمت المسطرة لقياس طول هذا السهم سنجد أن مقدار الازاحة المحصلة هو 22.4 km . ولإيجاد اتجاه المحصلة تقاس الزاوية θ باستخدام المنقلة وهى تساوى 26.5° في الاتجاه الجنوبى الشرقى .

ليس من الضروري أن تكون جميع المتجهات متعامدة حتى يكمن استخدام هذه الطريقة في العمل . لنفرض أنك تريد جمع ازاحة قدرها 5 km في الاتجاه الجنوبى وازاحة

قدرها 10 km في الاتجاه الشمالى الشرقى . تمثل هذه المسألة بيانيا كما بالشكل ١ - ٥ ، ومن الواضح أن الحل ليس أكثر صعوبة من تلك الحالة التى تكون فيها الازاحات الموجهة متعامدة . وإذا كان لدينا العديد من المتجهات فان الحل سيكون مشابها تماما للشكل ١ - ٤ .



(أ)



(ب)

شكل ١ - ٦

يمكن تمثيل جذب الخيط للحلقة (الشد في الخيط) بمتجه السرعة F .

١ - ٢ متجهات أخرى غير الازاحة
يمكن استخدام المتجهات لتمثيل أية كمية ذات مقدار واتجاه معا . وللأغراض العملية لابد أن تتبع هذه الكمية نفس القوانين الرياضية التى تحكم الازاحة . وفى الحقيقة فان جميع الكميات ذات الاتجاه تحقق هذا الشرط . وعلى سبيل المثال نلاحظ أن القوى هى كميات موجهة هامة . ويمثل الشكل ١ - ٦ أحد المواقف النموذجية التى توضح الطبيعة الاتجاهية للقوى .

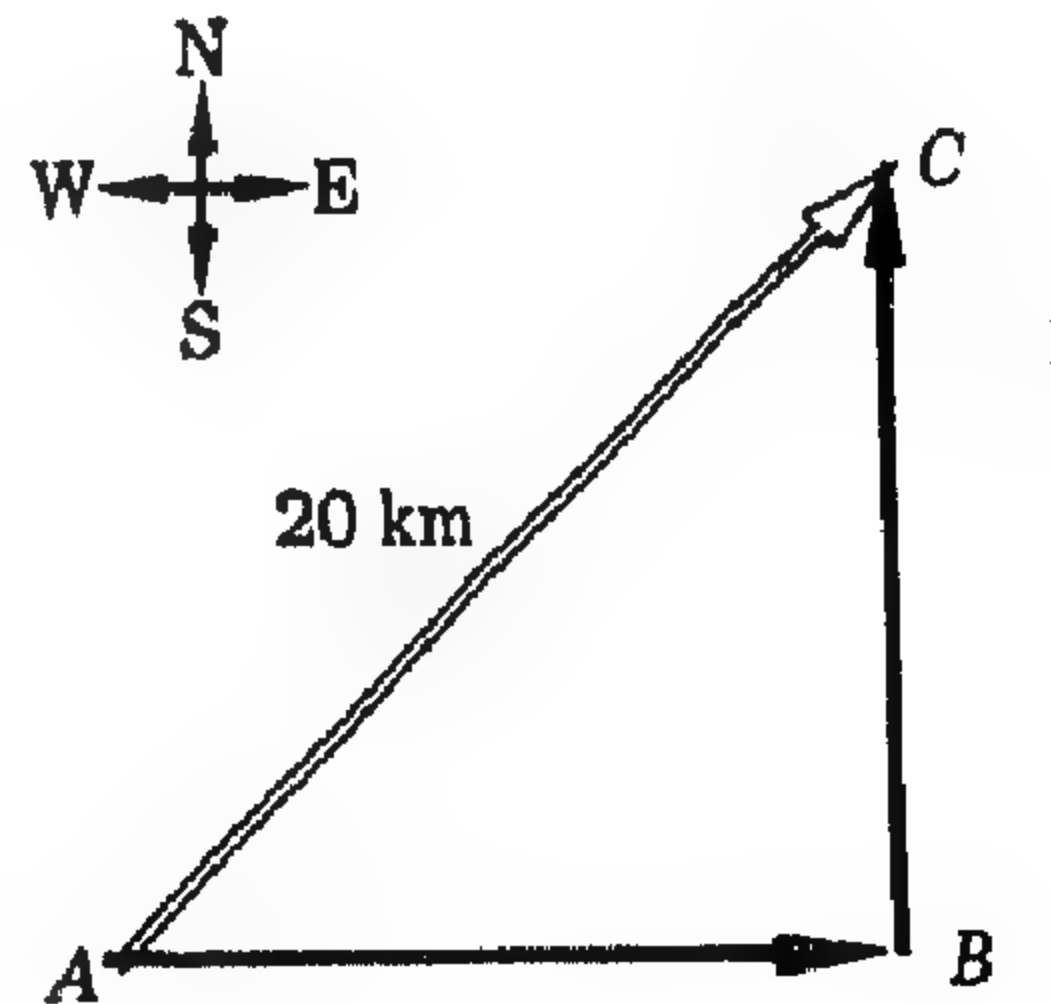
يمثل الشكل ١ - ٦ أ خيط يشد حلقة مثبتة فى قائم . تسمى القوى التى يجذب الخيط بها الجسم المثبت فيه بالشد فى الخيط . وكما هو واضح فى الشكل تمثل F هذا الشد ، وهذه القوة التى يؤثر بها الخيط على الحلقة مقدار قيمته F واتجاهه (الى اليمين) . وعليه فمن الممكن تمثيل هذه القوة بالمتجه (أو السهم) الموضح ، ويرسم هذا السهم بحيث يتناسب طوله مع مقدار القوة F . وحيث أن القوة تجذب الحلقة الى اليمين فان السهم الممثل لها يتجه أيضا الى اليمين .

يمكن تمثيل الموقف الموضح بالشكل ١ - ٦ أ بالرسم البيانى التخطيطى المناسب الموضح بالشكل ١ - ٦ ب . وهنا تظهر السمة الأساسية للجزء أ ، وهى القوة المؤثرة على الحلقة الدائرية ، بجلاء بدون الحاجة الى أية تفاصيل زائدة . وتسمى مثل هذه الرسوم البيانية التخطيطية برسوم بيان الجسم الحر وسوف نستخدمها كثيرا فى هذا المجال .

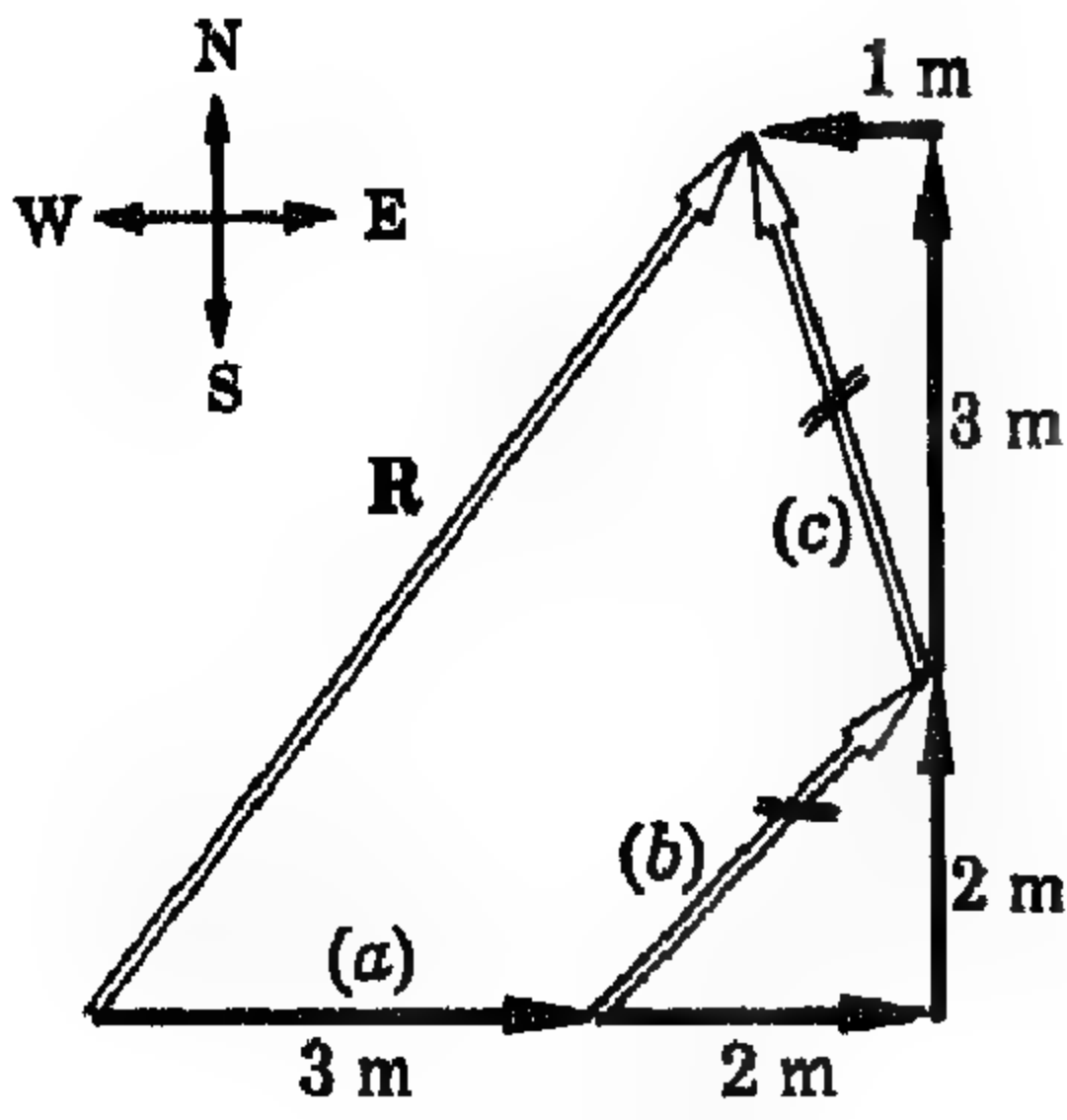
من المعتاد تمثيل متجهات القوة بالرمز F حيث يستخدم الحرف الثخين لتنبية القارئ الى أن الكمية التى يمثلها ذات اتجاه ومقدار معا* أما اذا لم يكن اتجاه القوة هاما فان مقدارها يمثل عادة بالرمز العادى F دون استخدام الحرف الثخين .

تعتبر سرعة الجسم المتحرك مثالا آخر للكميات الموجهة ، فنحن نقول أنه يتحرك بسرعة قدرها 20 mi/h (miles per hour) شرقا . وعليه فان هذه الكمية يمكن تمثيلها بسهم يشير الى الشرق .

شكل ١ - ٧
تحلل الازاحة 20 km فى الاتجاه الشمالى الشرقى الى مركبتى الازاحة AB فى الاتجاه الشرقى و BC فى الاتجاه الشمالى . المتجهان AB و BC هما مركبتا المتجه AC.



* عند كتابة رمز المتجه باليد على الورق أو السبورة يمكن استخدام طريقتين مختلفتين لتمييز المتجهات ، فأما أن يوضع خط موج تحت الرمز هكذا \vec{F} أو يوضع سهم فوقه هكذا \vec{F} .



شكل (١ - ٨)

يبين الشكل أن مجموع عدد معين من المتجهات يكافئ تماما مجموع مركبات هذه المتجهات .

تعريف

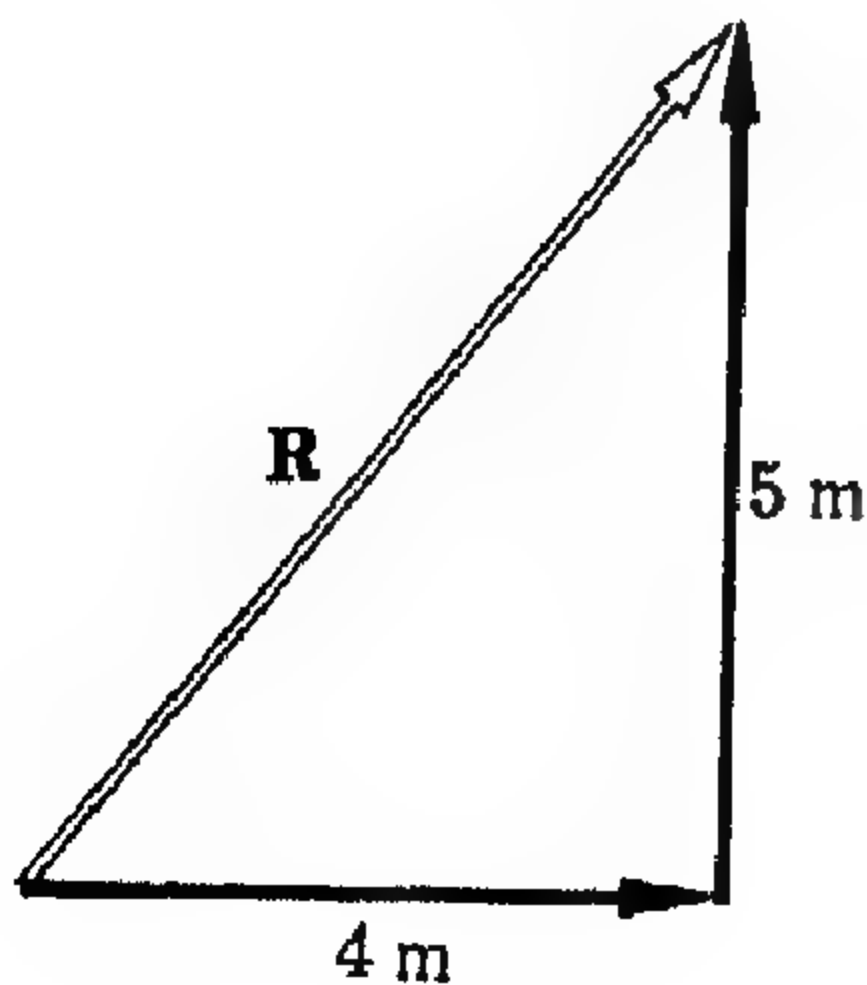
وبالرغم من أن كثيرا من الكميات الأخرى يمكن تمثيلها بمتجهات ، فرمما كانت لمتجهات الثلاثة السابق ذكرها - الإزاحة ، القوة ، السرعة - أكثرها شيوعا . وسنرى في الجزء التالى أن جميع المتجهات يمكن معاملتها بنفس الطريقة . ومن ثم ، فإذا تعلمنا كيف نتعامل مع متجهات الإزاحة فإن متجهات القوة والسرعة يمكن أن تعامل بأسلوب مشابه ولن تمثل أية صعوبة .

١ - ٣ المركبات المتعامدة للمتجهات

لنفرض أن شخصا ما قد سافر مسافة 20 km في الاتجاه الشمالى الشرقى . عندئذ يمكن رسم المتجه المناسب كما هو مبين بالشكل ١ - ٧ . ولكن من الواضح أن هذا الشخص يمكنه أن يصل الى نفس نقطة النهاية اذا سافر شرقا الى النقطة B ثم شمالا الى النقطة C مباشرة . من هذا نرى أن المتجهين الملونين ، عند جمعهما معا ، يكافئان المتجه 20 km وحده . تسمى المتجهات العديدة التى تعطى عند جمعها سويا متجها واحدا (مثل جمع المتجهين \overrightarrow{AB} و \overrightarrow{BC} ليعطيا \overrightarrow{AC} بمركبات هذا المتجه . لنبحث الآن كيف يمكننا استخدام مفهوم المركبات لتبسيط عملية جمع المتجهات .

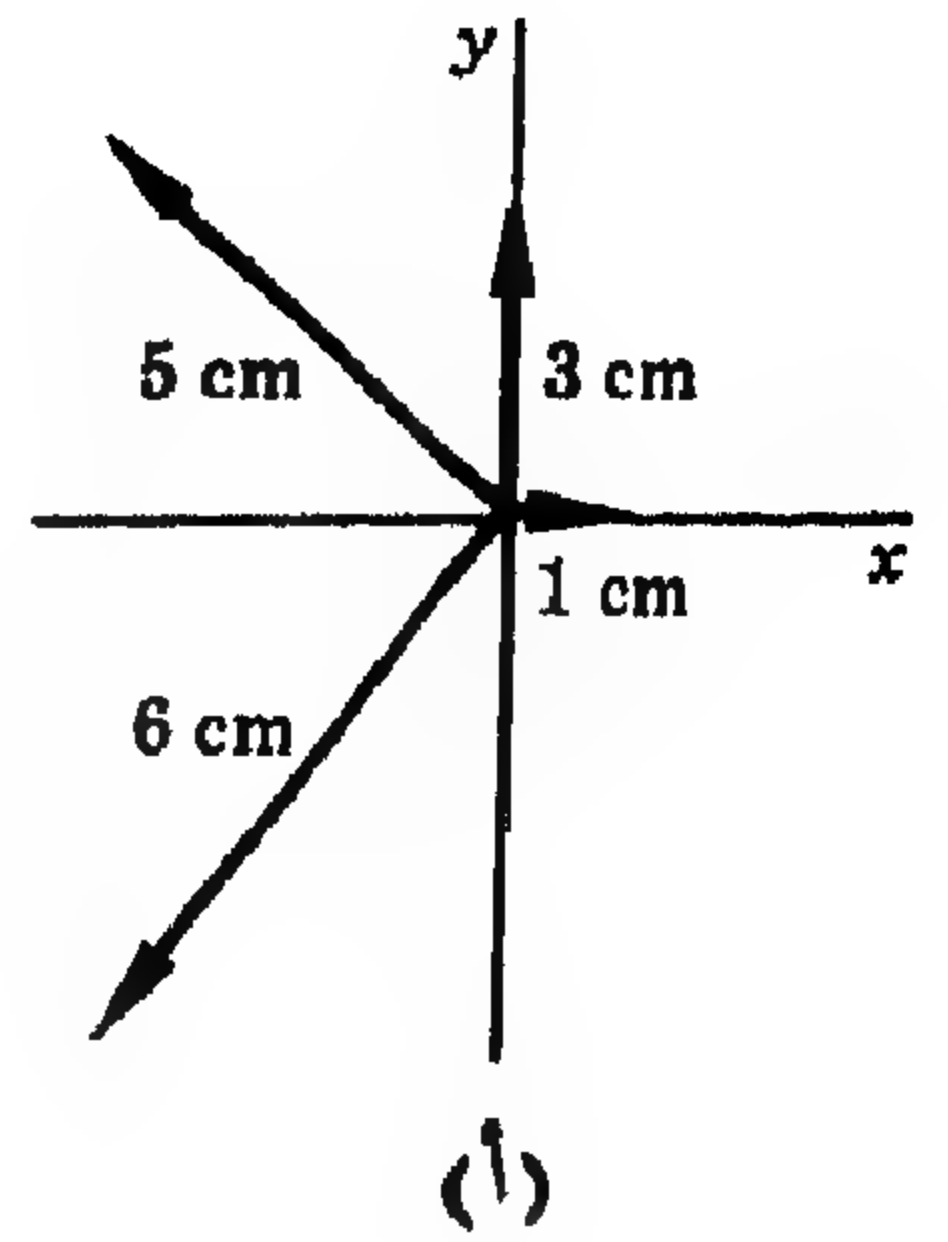
مثال توضيحي ١ - ٣ : تنبنى طريقة المركبات لجمع المتجهات على أساس أن أى متجه يمكن اعتباره كما لو كان مكونا من مركبات متعامدة كل على الأخرى . ولكى نبين كيف يمكن اجراء عملية جمع المتجهات لنرجع مرة ثانية الى متجهات الإزاحة الموضحة بالشكل ١ - ٨ . يتجه المتجه الأول (a) بأكمله الى الشرق . ولكن المتجه الثانى (b) يتكون من جزئين كما هو مبين ، أولهما 2m تجاه الشرق والثانى 2m تجاه الشمال* . وبنفس الطريقة فإن المتجه (c) يتكون من مركبتين أولاهما 3m فى الاتجاه الشمالى وثانيتهما 1m فى الاتجاه الغربى . ولكن إزاحة قدرها 1m فى الاتجاه الغربى تعادل إزاحة قدرها 1m مطروحة من الإزاحة المتجهة الى الشرق . لهذا السبب فإن من الممكن تمثيل الإزاحة المتجهة الى الغرب بإزاحة سالبة متجهة الى الشرق . بناء على ذلك سوف تمثل المركبة 1m المتجهة الى الغرب بمتجه 1m - فى الاتجاه الشرقى .

طريقة الحل : إذا أردنا إيجاد محصلة متجهات الإزاحة الثلاثة هذه فإننا سنرى أن الحركة الكلية فى الاتجاه الشمالى هي $5m = 0 + 2 + 3$ حيث يمثل الصفر حقيقة أن المتجه (a) فى الشكل ١ - ٨ ليس له مركبة فى الاتجاه الشمالى . بنفس الطريقة سنجد أن الحركة الكلية فى الاتجاه الشرقى هي $4m = 3 + 2 - 1$. أى أننا قد تحركنا مسافة 4m شرقا ومسافة 5m شمالا . وعليه فإن هاتين المركبتين لابد أن تكونا مركبتى المتجه المحصل . ويمثل الشكل ١ - ٩ هذا المتجه المحصل ويلاحظ أنه يساوى R فى

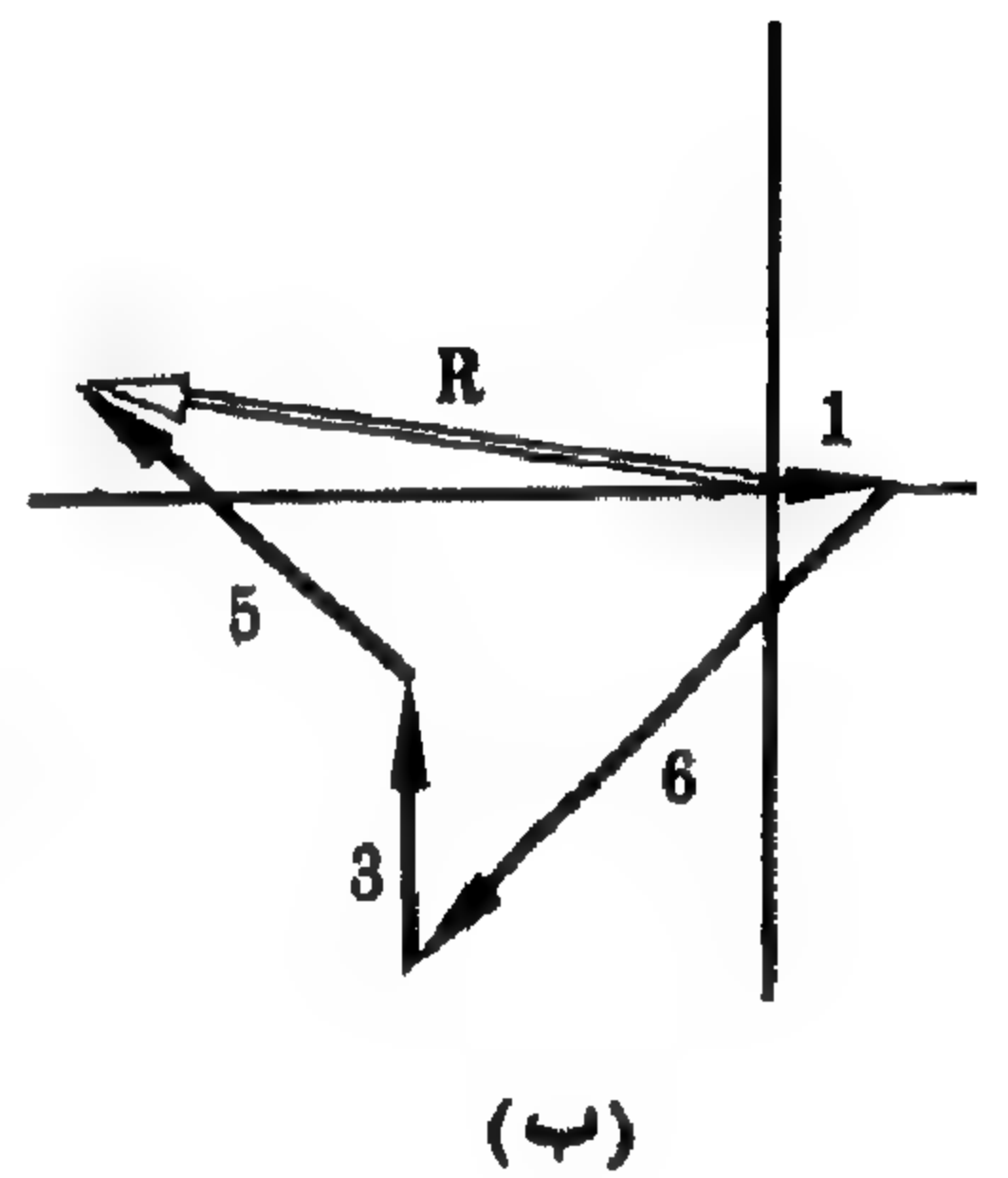


* 1m أطول قليلا من 1 yd ، بالضبط $1m = 3.28 ft$.

الشكل ١ - ٨ . ومن الطبيعي أن يعطى مقدار المتجه المحصل R بالعلاقة $R = \sqrt{4^2 + 5^2}$.

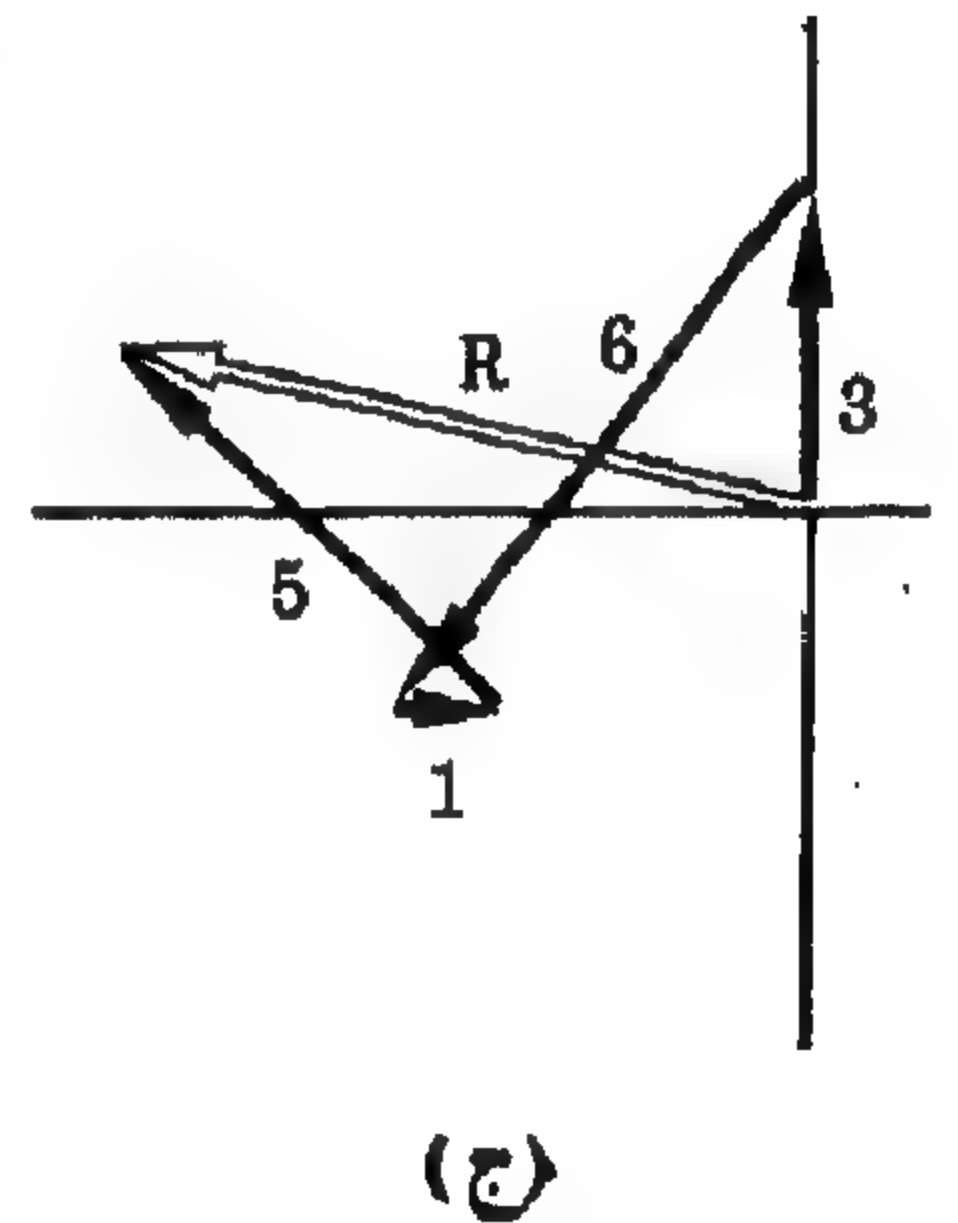


وحيث أن الشيء الوحيد المطلوب لتعيين R هو معرفة المسافة المقطوعة شرقا والمسافة المقطوعة شمالا فإن الترتيب الذى تمت به الحركتان ليس مهما على الإطلاق . بناء على ذلك يمكننا القول بأن الترتيب الذى نجمع به المتجهات غير ذى أهمية ، إذ أننا ببساطة نحسب الحركة الكلية فى الاتجاه الشرقى والحركة الكلية فى الاتجاه الشمالى . هاتان الحركتان الكليتان هما إذن مركبتا الحركة المحصلة فى الاتجاه الشرقى والشمالى . لذلك يكون من المناسب عادة استبدال المتجه بمركبتيه . ولكى نبين أن هذا هو ما نفعله فعلا فى رسم بيان المتجهات فإننا قد شطبنا المتجه الأصيل مع استبقاء مركبتيه فقط ، وسنوضح ذلك بوضع علامة الشق الطولى على المتجه الأصيل الواجب استبداله بمركبتيه . لذلك فإننا قد وضعنا علامة الشق الطولى على المتجهين (b) و (c) فى الشكل ١ - ٨ ، وعند حساب الحركة المحصلة فإننا قد استبدلنا هذين المتجهين بمركباتهما .



مثال توضيحي ١ - ٤ : اجمع متجهات الازاحة الموضحة فى الشكل ١ - ١٠ أ (تذكر أن 2.54 cm تكافئ 1 in) .

طريقة الحل : سنستخدم محاور الاحداثيات x, y لتمييز اتجاهاتنا وليس الشرق والغرب . ولكن الطريقة ستظل دون تغيير . وفى هذه الحالة سنجرى عملية جمع المتجهات بيانيا بالرغم من أننا سنرى فى الجزء التالى أن استخدام المركبات ربما كان طريقة أفضل لحل المسألة .



يوضح الشكل ١ - ١٠ ب الجمع البيانى الفعلى لهذه المتجهات ، ويلاحظ أن المتجهات قد رسمت بحيث ينطبق ذيل المتجه مع رأس المتجه السابق وأن المتجه المحصل يمتد فى الاتجاه من نقطة البداية الى نقطة النهاية وليس العكس . وقد يتبادر الى الذهن ذلك السؤال المنطقي عما اذا كنا سنحصل على نفس المحصلة اذا جمعت المتجهات بترتيب مختلف . عند اختبار ذلك فى الجزء (ج) من الشكل سنرى أن المحصلة لا تعتمد على الترتيب الذى رسمت به المتجهات . ولكننا لا يجب أن ندهش من أن هذا صحيحا إذ أن R تعطى ببساطة النتيجة النهائية لجميع مركبات الازاحة فى اتجاه المحورين x و y ، ولن تعتمد على الترتيب الذى تم به جمع هذه المركبات .

شكل (١ - ١٠) يمكن جمع المتجهات الأربعة الموضحة فى (أ) كما هو مبين فى (ب) أو (ج) للحصول على محصلتها . لاحظ أن الترتيب الذى تؤخذ به هذه المتجهات لا أهمية له .

١ - ٤ الطرق المثلثية :

تعتبر الطريقة البيانية لجمع المتجهات طريقة مرضية اذا كان الشخص ماهرا في الرسم ، صبورا ولديه مسطرة ومنقلة . ومع ذلك فمن المناسب للكثير منا أن يستعمل طريقة أسرع وأقل ارهاقا لجمع المتجهات . وفي الحقيقة فان تعلم قليل من القواعد الأساسية لعلم حساب المثلثات ، وهذا لن يستلزم الا دقائق معدودة ، يتيح لنا طريقة مناسبة جدا لجمع المتجهات . سنذكر الآن هذه القواعد .

شكل (١ - ١١)

تعرف النسبة المثلثية بدلالة

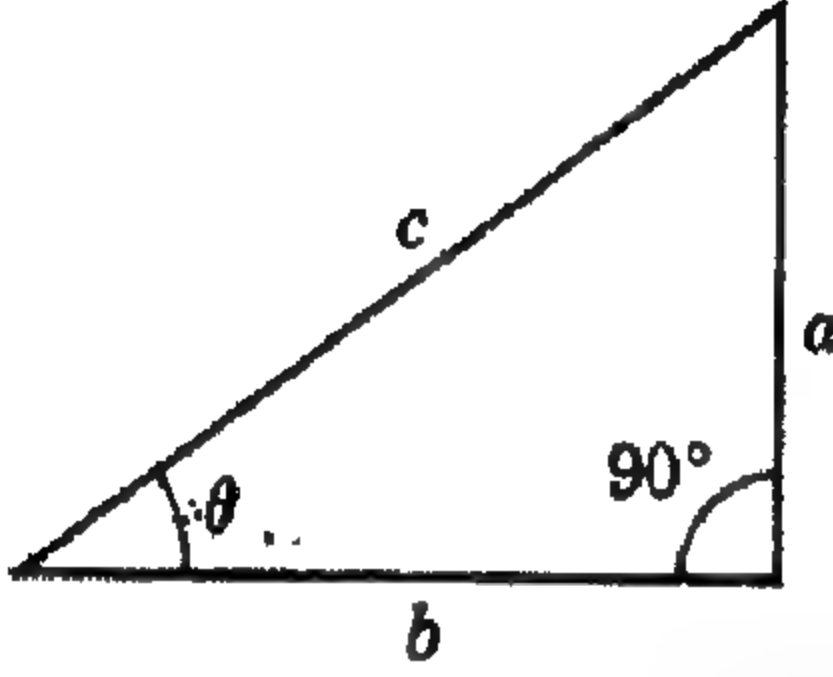
المثلث قائم الزاوية كما يلي

$$\sin \theta = a/c, \cos \theta = b/c, \tan \theta = a/b.$$

$$\sin \theta$$

$$\cos \theta = \frac{b}{c}$$

$$\tan \theta = \frac{a}{b}$$



تعريف

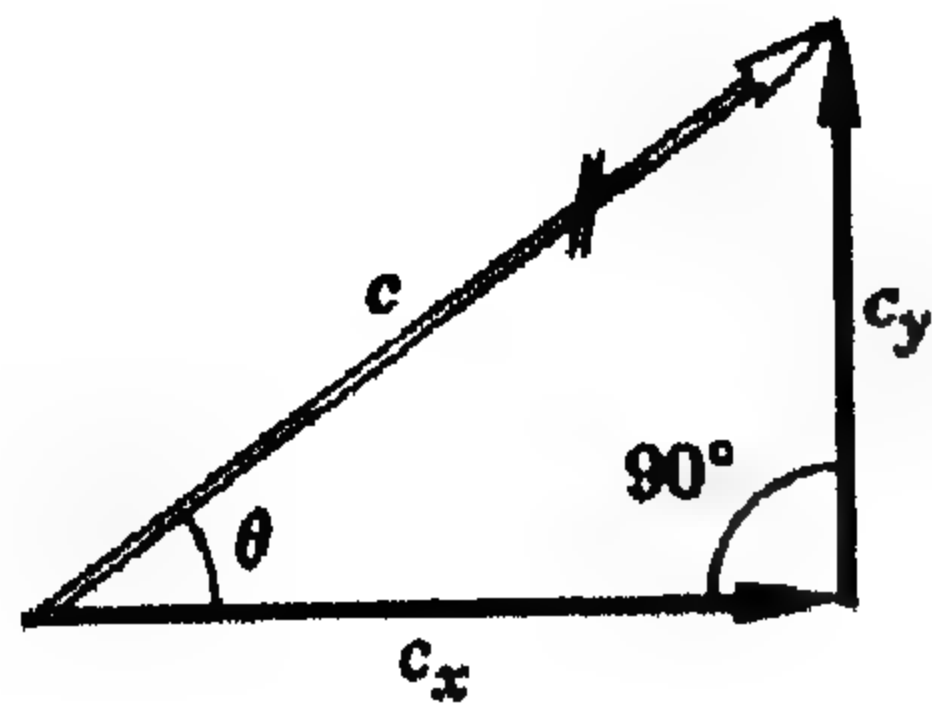
يمكن إيجاد المحصلة بسهولة بمعلومية مركبات المتجهات في اتجاه الشرق والشمال (أو في اتجاه المحورين x و y) ، وهذا واضح لأن المركبة x للمحصلة هي مجموع جميع المركبات x للمتجهات والمركبة y للمحصلة هي مجموع جميع المركبات y للمتجهات . وتظهر فعالية علم حساب المثلثات في أنه يتيح لنا طريقة سهلة لإيجاد مركبات المتجهات . هناك ثلاث كميات هامة متعلقة بالمثلثات قائمة الزاوية تسمى بالنسب المثلثية ، ولقد حسبت هذه الكميات ووضعت في جداول النسب المثلثية ، ومن أمثلتها تلك الجداول المدرجة في الملحق ٥ . والرجوع الى شكل ١ - ١١ يمكننا أن نتعرف على هذه الكميات . تعرف هذه النسب المثلثية الثلاث بالمعادلات التالية :

$$\sin \theta = \frac{a}{c} \quad \cos \theta = \frac{b}{c} \quad \tan \theta = \frac{a}{b}$$

بالرجوع الى الشكل ١ - ١٢ واستخدام التعريفات السابقة يتضح لنا أن المركبة x للمتجه c هي $c \cos \theta$ تساوي $c \cos \theta$. بالمثل فان المركبة y للمتجه c هي $c \sin \theta$ تساوي $c \sin \theta$ فاذا علمنا قيمة كل من $\cos \theta$ و $\sin \theta$ يمكننا بسهولة ضرب هاتين القيمتين في c لنحصل على مركبتى المتجه c في الاتجاهين x و y ، ومن هنا تتضح أهمية جداول النسب المثلثية . لنوضح ذلك باستخدام بعض الأمثلة .

مثال توضيحي ١ - ٥ : اوجد مركبتى المتجه الموضح في الشكل ١ - ١٣ .
طريقة الحل : هاتان المركبتان c_x و c_y موضحتان في الشكل . باستخدام تعريف الجيب وجيب التمام والاستعانة بالشكل نجد أن :

$$\cos \theta = \frac{c_x}{20} \quad \text{و} \quad \sin \theta = \frac{c_y}{20}$$



$$c^2 = c_y^2 + c_x^2$$

$$\sin \theta = \frac{c_y}{c}$$

$$\cos \theta = \frac{c_x}{c}$$

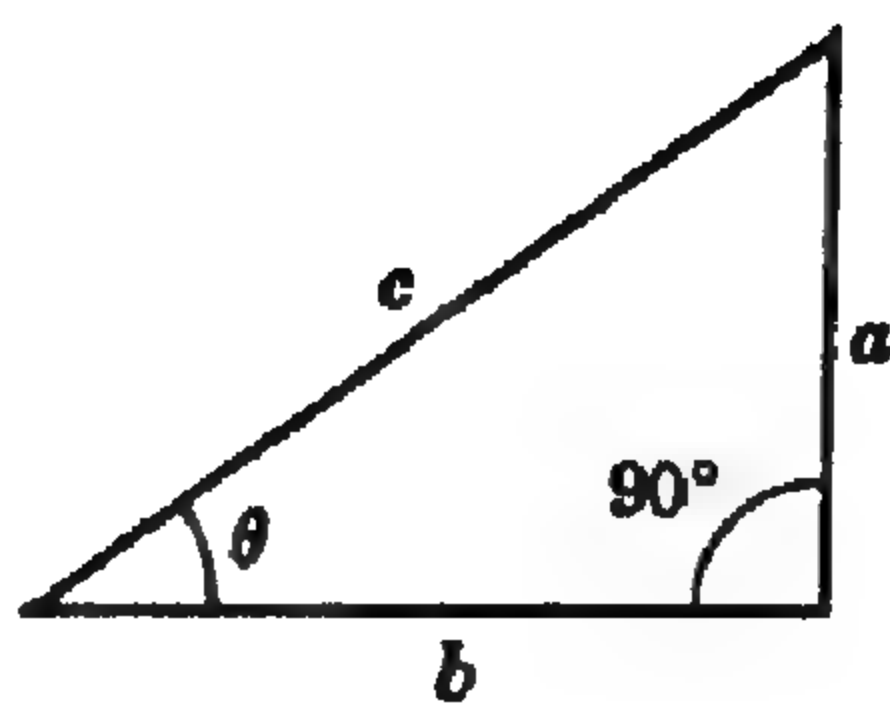
$$\tan \theta = \frac{c_y}{c_x}$$

$$c_y = c \sin \theta$$

$$c_x = c \cos \theta$$

$$c_y = c_x \tan \theta$$

تصبح



$$c^2 = a^2 + b^2$$

$$\sin \theta = \frac{a}{c}$$

$$\cos \theta = \frac{b}{c}$$

$$\tan \theta = \frac{a}{b}$$

تصبح

$$a = c \sin \theta$$

$$b = c \cos \theta$$

$$a = b \tan \theta$$

شكل (١ - ١٢)

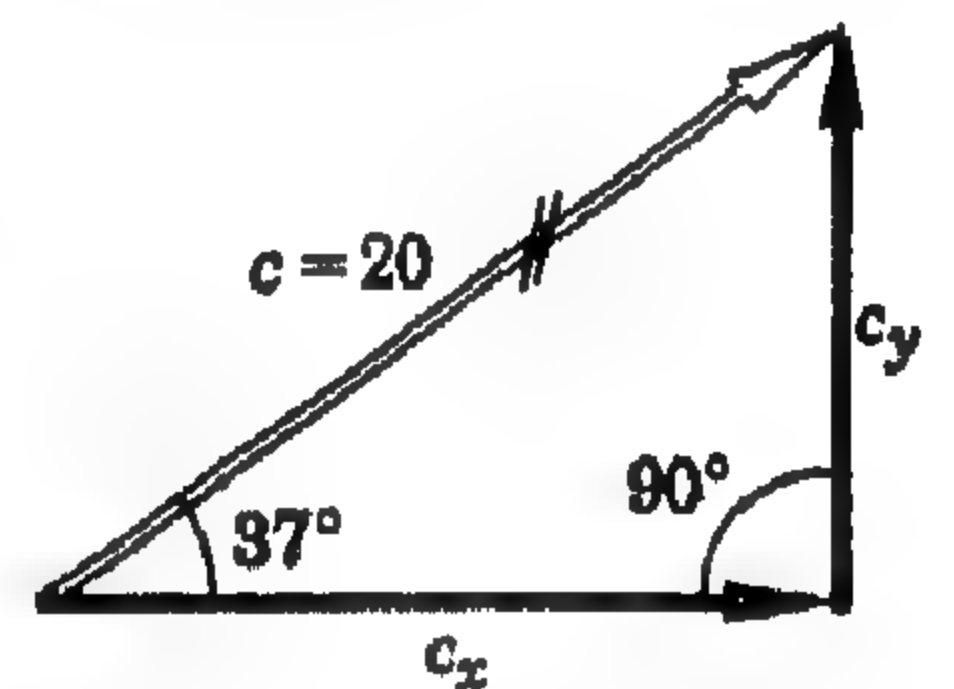
المركبة y لهذا المتجه هي $c \sin \theta$ والمركبة x له هي $c \cos \theta$

شكل (١ - ١٣)

المركبة y لمتجه مقداره 20 وحدة هي $(\sin 37^\circ) (20)$ أو 12 ، أما المركبة x له فهي $(\cos 37^\circ) (20)$ أو 16 .

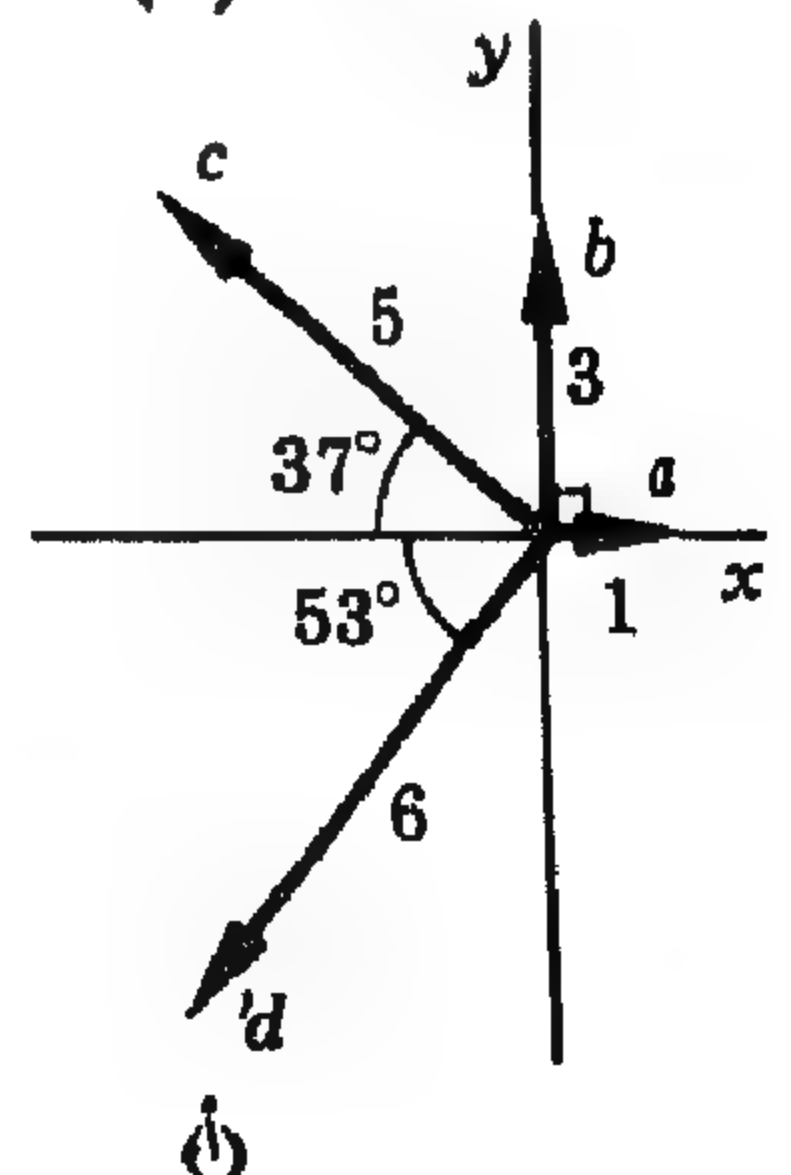
$$c_x = 20 \cos \theta = 20(0.80) = 16$$

$$c_y = 20 \sin \theta = 20(0.60) = 12$$



شكل (١ - ١٤)

يمكن جمع المتجهات الموضحة في (أ) باستخدام طريقة المركبات لتعطى المحصلة الموضحة في (د) .



حيث $\theta = 37^\circ$ في هذه الحالة . باستخدام جداول النسب المثلثية (أو الحاسب) نجد أن $\sin 37^\circ = 0.60$ و $\cos 37^\circ = 0.80$. بالتعويض عن هذه القيم سنجد أن $c_x = 16$ و $c_y = 12$.

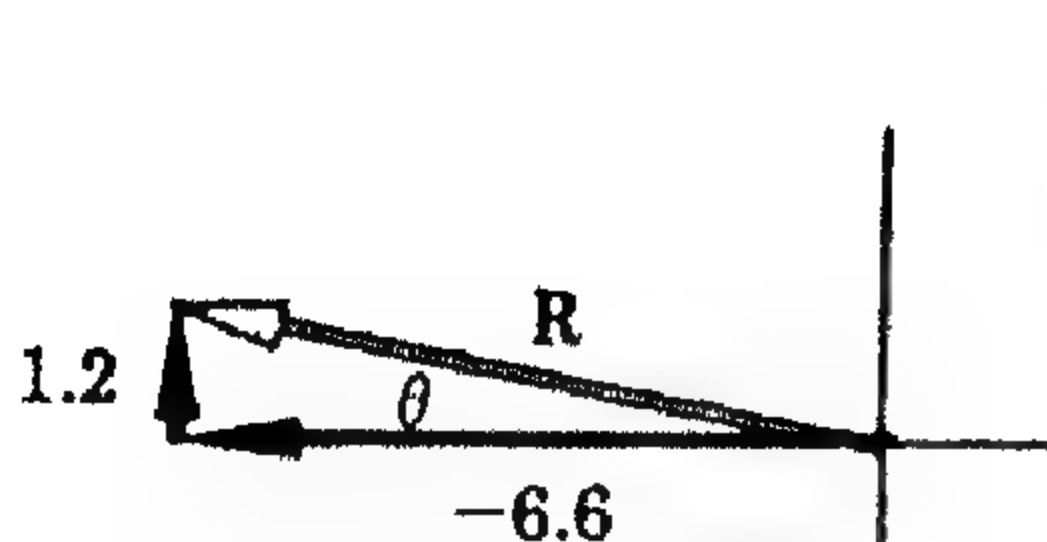
مثال توضيحي ١ - ٦ : اجمع المتجهات الموضحة بالشكل ١ - ١٤ ، باستخدام طريقة المركبات .

طريقة الحل : لقد رمزنا ، كما هو موضح ، الى المتجهات بالرموز a, b, c, d . يلاحظ أن كلا من المتجهين a و b له مركبة واحدة تختلف عن الصفر . لايجاد مركبتى المتجه c يمكن الاستعانة بالجزء ب من الشكل . وحيث أن $\sin \theta = (\text{opposite side}) / \text{hypotenuse}$ يمكننا ايجاد المركبة y للمتجه :

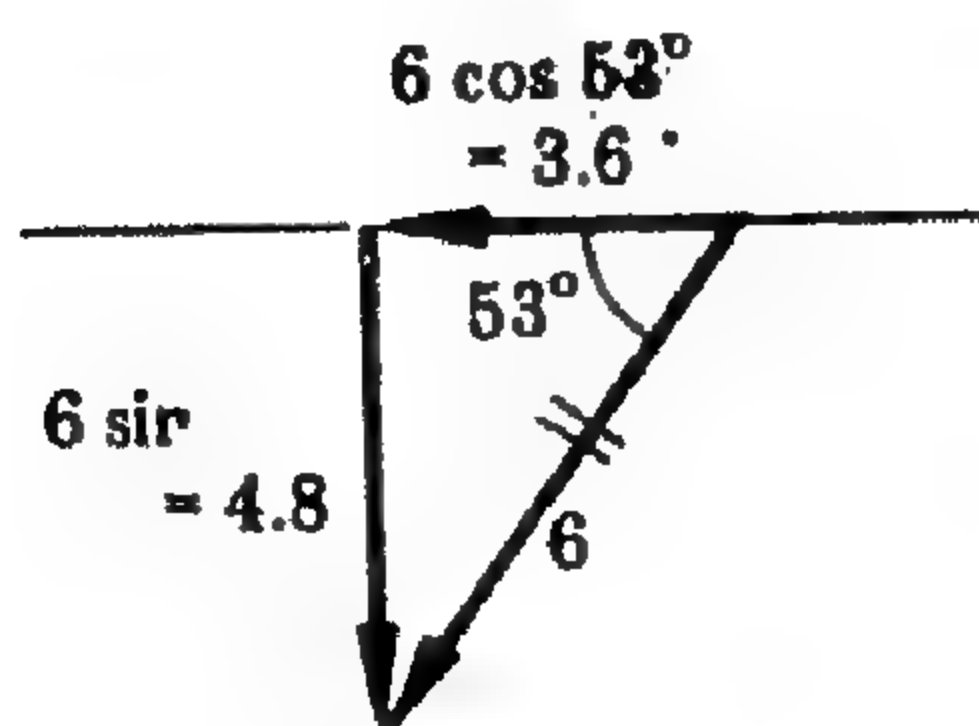
$$y \text{ component} = (\text{hypotenuse})(\sin 37^\circ) = (5)(0.60) = 3$$

بالمثل فإن $\cos \theta = (\text{adjacent side}) / \text{hypotenuse}$ ، وهذا يعطى

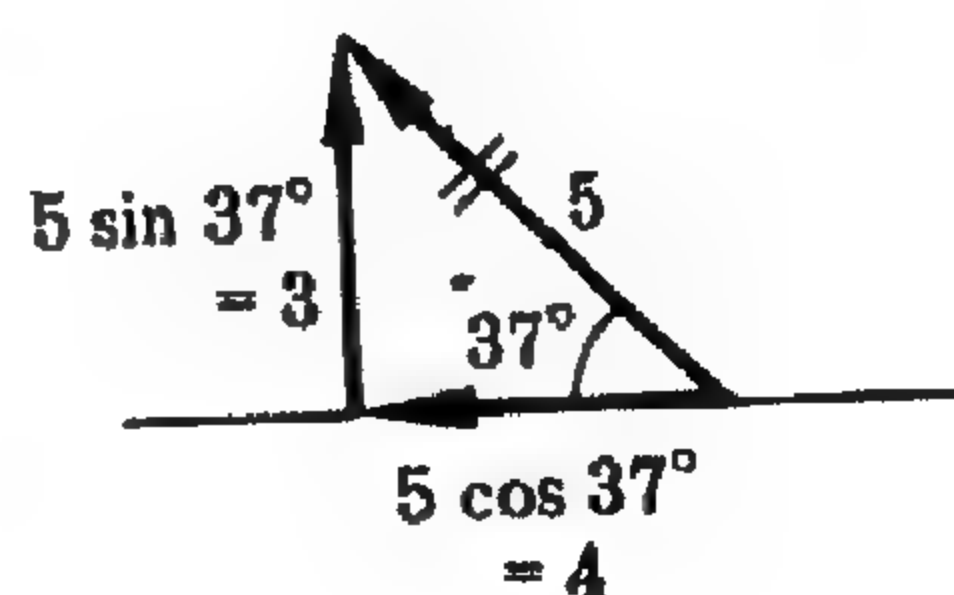
$$\text{Adjacent side} = (5)(\cos 37^\circ) = 4$$



(د)



(ج)



(ب)

ولكن هذا مقدار المركبة x . ولكن هذه المركبة سالبة لأنها تشير الى الاتجاه $-x$.
وعليه فان مركبة المتجه الذى مقداره 5 وحدات هي -4 .

يمكن استخدام طريقة مشابهة ، وهى الموضحة فى الشكل ١ - ١٤ جـ لايجاد مركبتى المتجه الذى مقداره 6 وحدات . مركبتى هذا المتجه فى الاتجاهين x ، y هما -3.6 و -4.8 على الترتيب . وهكذا فان مركبات جميع المتجهات قد أصبحت معلومة الآن . وحتى نعتاد على هذه الطريقة من المفيد ترتيب المتجهات فى جدول كالتالى :

المركبة y	المركبة x	المتجه
$a_y = 0$	$a_x = +1.0$	a
$b_y = +3.0$	$b_x = 0$	b
$c_y = +3.0$	$c_x = -4.0$	c
$d_y = -4.8$	$d_x = -3.6$	d
$R_y = +1.2$	$R_x = -6.6$	المحصلة

يلاحظ عند اعداد هذا الجدول أن المركبات التى تشير الى الاتجاه السالب للمحورين x و y قد اعتبرت سالبة . وحيث أن مركبتى المحصلة قد أصبحت معلومة الآن فان من الممكن رسمها كما هو موضح بالشكل ١ - ١٤ د . وباستخدام نظرية فيثاغورث نجد أن

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(-6.6)^2 + (1.2)^2} = 6.7$$

ولكن حل المسألة ليس كاملاً حتى الآن إذ من الضروري ايجاد قيمة الزاوية θ فى الشكل ١ - ١٤ د . يمكن تحقيق ذلك بسهولة باستعمال تعريف الظل . اذن :

$$\tan \theta = \frac{R_y}{R_x} = \frac{1.2}{6.6} \approx 0.18$$

حيث نقرأ العلامة \approx هكذا « تساوى تقريبا » . باستخدام جدول النسب المثلثية سنجد أن الزاوية التى ظلها 0.18 تساوى تقريبا 10.5° . وعليه فان $\theta = 10.5^\circ$ فى الاتجاه الشمالى الشرقى . وللحصول على قيمة أكثر دقة يمكننا استخدام العملية المسماة الاستكمال من الداخل ، أو يمكننا الرجوع الى جداول أكثر دقة مثل الجداول الموجودة فى الكتيبات المساعدة* ، كذلك يمكن استعمال الحاسبات اليدوية لايجاد الدوال المثلثية .

* يحتوى الكتاب « دليل الكيمياء والفيزياء » (شركة كيميكاى رابر للنشر) على مجموعة قيمة من الجداول الرياضية ، يحتوى على ثروة من المعلومات الأخرى ، ويمكن للكثيرين من العاملين فى مجالات العلم المختلفة الرجوع اليه .

١ - ٥ : جمع القوى

من السهل علينا الآن جمع مختلف أنواع المتجهات ، ونحن نعلم أن الترتيب الذى تتم به عملية جمع المتجهات ليس مهما على الاطلاق . كذلك فاننا قد فهمنا طريقة مناسبة جدا لجمع المتجهات وهى طريقة المركبات المثلثية المتعامدة .

مثال توضيحي ١ - ٧ : لندرس المسألة الموضحة فى شكل ١ - ١٥ أ ، يمثل الشكل المسقط الرأسى لمجموعة من الناس يجذبون قائما رأسيا بواسطة الحبال . ويمثل الجزء ب من الشكل القوة المؤثرة على القائم الرأسى لكل حبل مقدرة بالباوند . المطلوب إيجاد المحصلة النهائية للقوى المؤثرة على القائم بواسطة الحبال .

طريقة الحل : يمثل الجدول التالى مركبات القوى المعنية حيث اعتبر المتجه 12 lb أولا ثم أخذت المتجهات الأخرى بالترتيب فى عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للشكل (ليس هناك سبب محدد لذلك اذ أن الترتيب غير هام)

المركبة y باوند	المركبة x باوند	المتجه ، باوند
0.0	12.0	12
5.0	8.7	10
4.0	-3.0	5
-6.4	-4.8	8
2.6	12.9	المحصلة

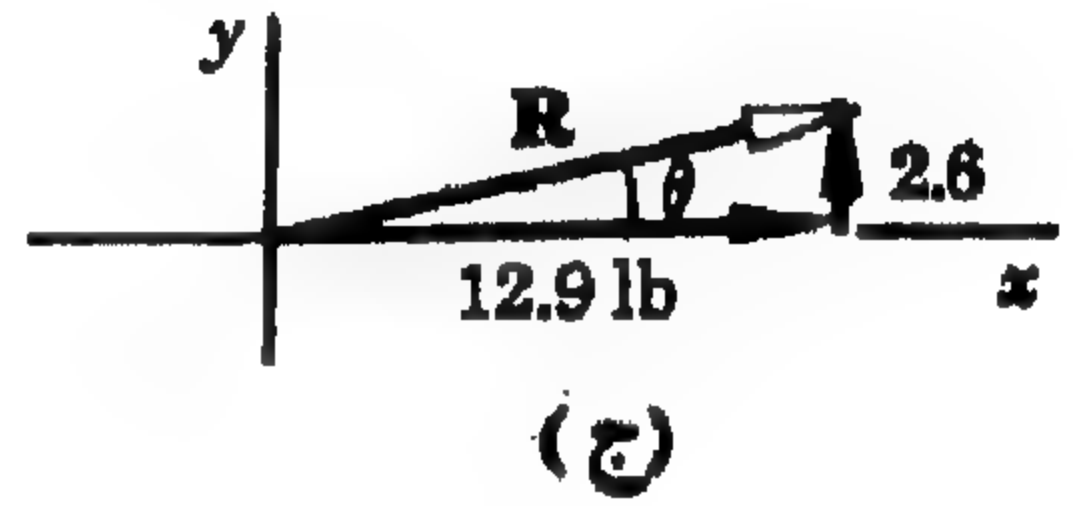
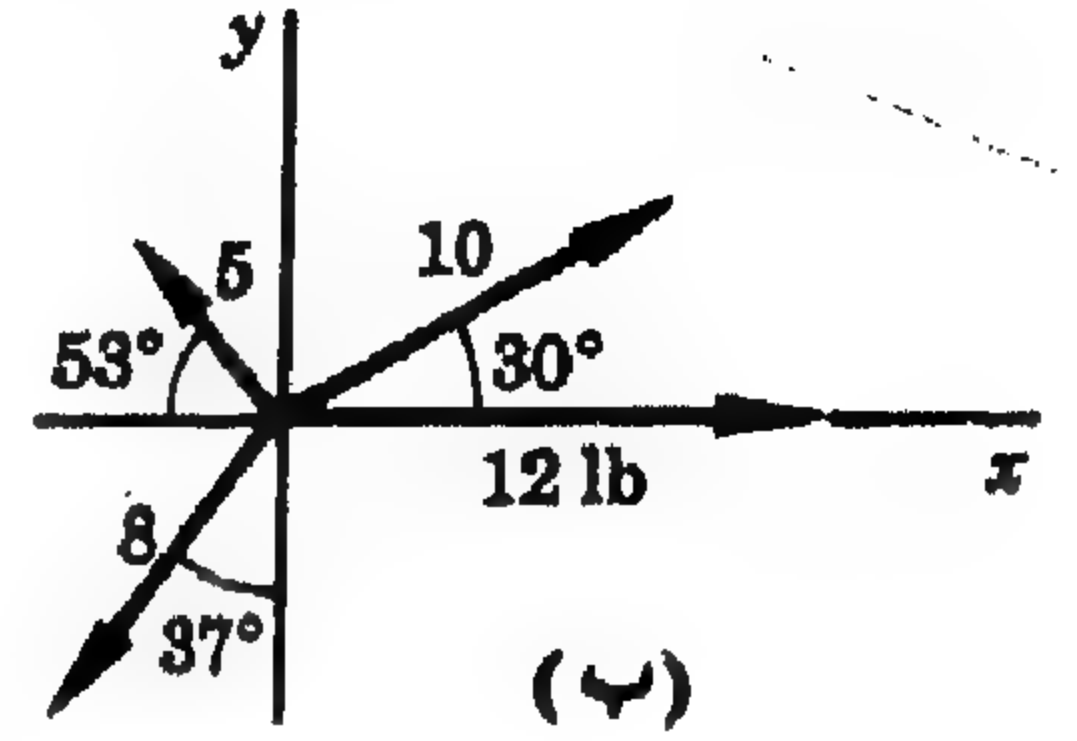
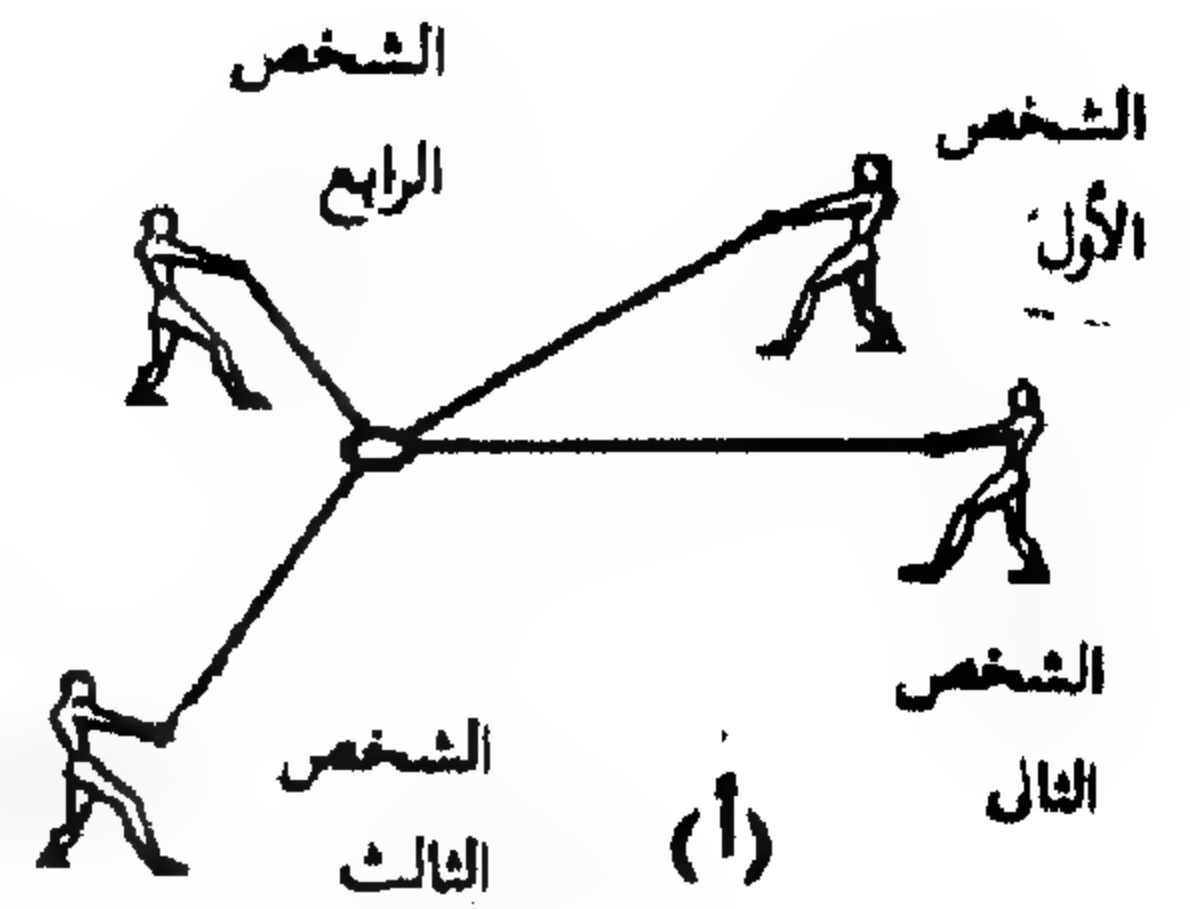
باستخدام نظرية فيثاغورث نجد أن :

$$R = \sqrt{(2.6)^2 + (12.9)^2} \text{ lb} = 13.2 \text{ lb}$$

يوضح الجزء ج من شكل ١ - ١٥ المحصلة . كذلك فان $\tan \theta = 2.6/12.9 \approx 0.20$ ومنه نجد أن $\theta = 11.5^\circ$.

من الضرورى دائما فحص رسم بيان المتجهات للتأكد من أنه ليس هناك خطأ فى المقدار أو الاتجاه . وحيث أن القوتين 10 lb و 12 lb تجذبان أساسا فى الاتجاه x+ والقوتين 5 lb و 8 lb تحاول كل منهما ان تتزن مع الأخرى ، فمن المعقول أن تكون محصلة جذب القائم فى اتجاه R الذى تم إيجاده .

بهذا تكتمل مناقشتنا لطرق جمع الكميات ذات الاتجاه أى المتجهات ونحن الآن مستعدون لتطبيق هذه الطرق فى المسائل المتعلقة بتأثير القوى المؤثرة على الأجسام . فى الجزء الباقى من هذا الفصل سنهتم فقط بتلك الحالة التى تتزن فيها القوى المؤثرة على الأجسام . أما القوى غير المتزنة فانها تسبب حركة الجسم وهو ما سنناقشه فى فصول قادمة .



شكل (١ - ١٥)

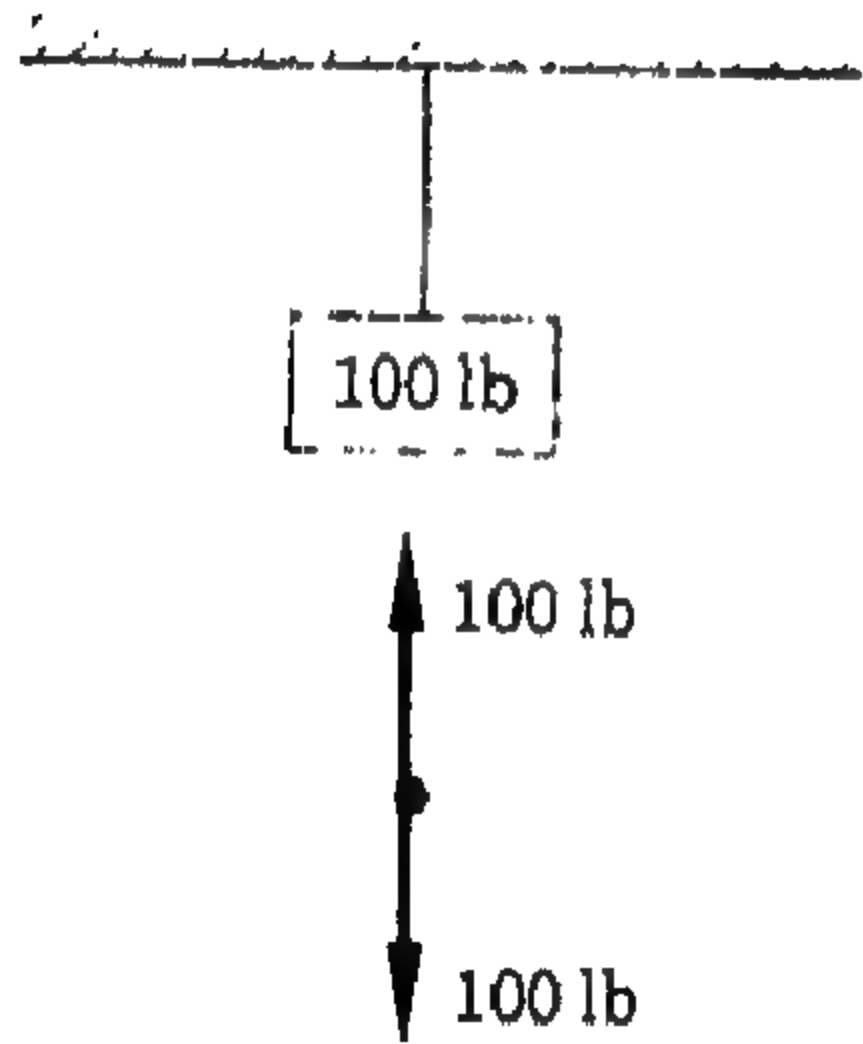
يمكن الحصول على المحصلة الموضحة فى (ج) بجمع المتجهات الموضحة فى (ب)

١ - ٦ الأجسام في حالة السكون :

لكي يظل الجسم في حالة السكون لابد أن يتعادل تأثير القوى الدافعة تماما مع تأثير القوى الجاذبة . ومع ذلك فحتى اذا اتزنت جميع القوى المؤثرة على الجسم فان هذه القوى قد تسبب دوران الجسم (وهذا ماسوف نناقشه بالتفصيل في الفصل الثامن) . ومع ذلك فاننا سنحصر اهتمامنا الآن فقط في تلك الحالة التي لا يتعرض فيها الجسم لأيّة قوى يمكن أن تسبب دورانه . أي أننا سوف ندرس الاجسام الساكنة والتي تستمر في حالة السكون .

تعريف

يقال أن الجسم في حالة توازن اذا كان ساكنا ومستمرا في السكون (ليس من الضروري أن يكون الجسم ساكنا لكي يكون في حالة التوازن ، ولكننا سنناقش هذه الحقيقة بالتفصيل في الفصل الثالث) . في كثير من الأحيان يكون واضحا لنا لماذا لا يتحرك الجسم ، فعلى سبيل المثال فان الجسم الموضح في شكل ١ - ١٦ والذي يزن 100 lb ساكن لأن الحبل المعلق في السقف يمنعه من السقوط .



عند فحص هذا الجسم بتفصيل أكثر سنرى أن هناك قوتين تؤثران عليه ، ونحن لا نحتاج فقط الا أن نحمل هذا الجسم في يدنا لنعلم أن هناك شيئا ما يجذبه في خط مستقيم نحو الأرض . هذا الجذب الى أسفل - أو القوة - الذي يؤثر على الجسم هو نتيجة للتجاذب الثقالي للأرض بالنسبة له . ولن نحاول الآن تفصيل هذه النقطة ولكننا سنناقشها بكثير من التفصيل في فصل لاحق . وفي هذا المقام فاننا سنستعمل تلك الحقيقة التي تنص على أن الجسم الساكن على سطح الأرض ينجذب نحوها بقوة نسميها وزن الجسم . هذه القوة ممثلة في الشكل ١ - ١٦ بمتجه مقداره 100 lb متجها الى أسفل . وسوف نشير الى هذه القوة في أحوال كثيرة بجذب الجاذبية الأرضية .

شكل (١ - ١٦)

تؤثر قوتان على الجسم الذي يزن 100 lb وهما شد الجاذبية الأرضية الى أسفل وجذب الحبل ومقداره 100 lb الى أعلى .

تبين المشاهدات التجريبية أن هذا الجسم لابد أن يسقط نحو الأرض مالم يؤثر عليه دفع أو شد الى أعلى بقوة مقدارها 100 lb . وفي حالتنا هذه يقوم الحبل بشد الجسم الى أعلى بقوة تساوي وزنه وهو 100 lb ، وتمثل هذه القوة في الشكل ١ - ١٦ بالمتجه 100 lb الى أعلى . بناء على ذلك فنحن نعلم من هذه التجربة أنه لكي لا يتحرك الجسم الى أعلى أو الى أسفل لابد أن تترن القوى الرأسية المؤثرة على الجسم . وفي هذه الحالة يتعادل الشد في الحبل وهو 100 lb الى أعلى تماما مع القوة 100 lb الى أسفل الناتجة من التجاذب الثقالي للأرض .

لاحظ أننا نتكلم فقط عن القوى المؤثرة على الجسم المعنى ، وبالذات عن جسم معلق في نهاية حبل . هناك بالطبع قوى أخرى تؤثر على الأجسام المبينة في شكل ١ - ١٦ ، فهناك مثلا القوى التي يؤثر بها السقف على الحبل . ولكننا ندرس الآن

فقط تلك القوى المؤثرة على الجسم المعلق في الحبل . وتبين التجربة أن الجسم سوف يستمر معلقا في حالة السكون اذا كانت محصلة جميع القوى التي تجذب الجسم الى أعلى مساوية تماما لمحصلة جميع القوى التي تجذب الجسم الى أسفل . وحيث أننا نهتم فقط بالقوى المؤثرة على الجسم ، فمن المناسب أن نرسم رسم بيان الجسم الحز كما هو موضح في الجزء السفلي من شكل ١ - ١٦ الذي يبين الأساسيات فقط وهي القوى المؤثرة على الجسم . ويلاحظ من الوهلة الأولى أن القوة المتجهة الى أعلى تتزن مع القوة المتجهة الى أسفل ولذلك فإن الجسم لا يتحرك .

لندرس الآن العربة الصغيرة المبينة في شكل ١ - ١٧ أ ، وتزن هذه العربة 50 lb . هناك شخص ما يجذب العربة الى اليسار بواسطة حبل متصل بها بقوة قدرها 30 lb بينما يجذبها الزنبرك المثبت في الحائط الى اليمين . سنفترض كتقريب مناسب أن احتكاك العجلات يمكن اهماله . ما هي القوى المؤثرة على هذا الجسم ؟

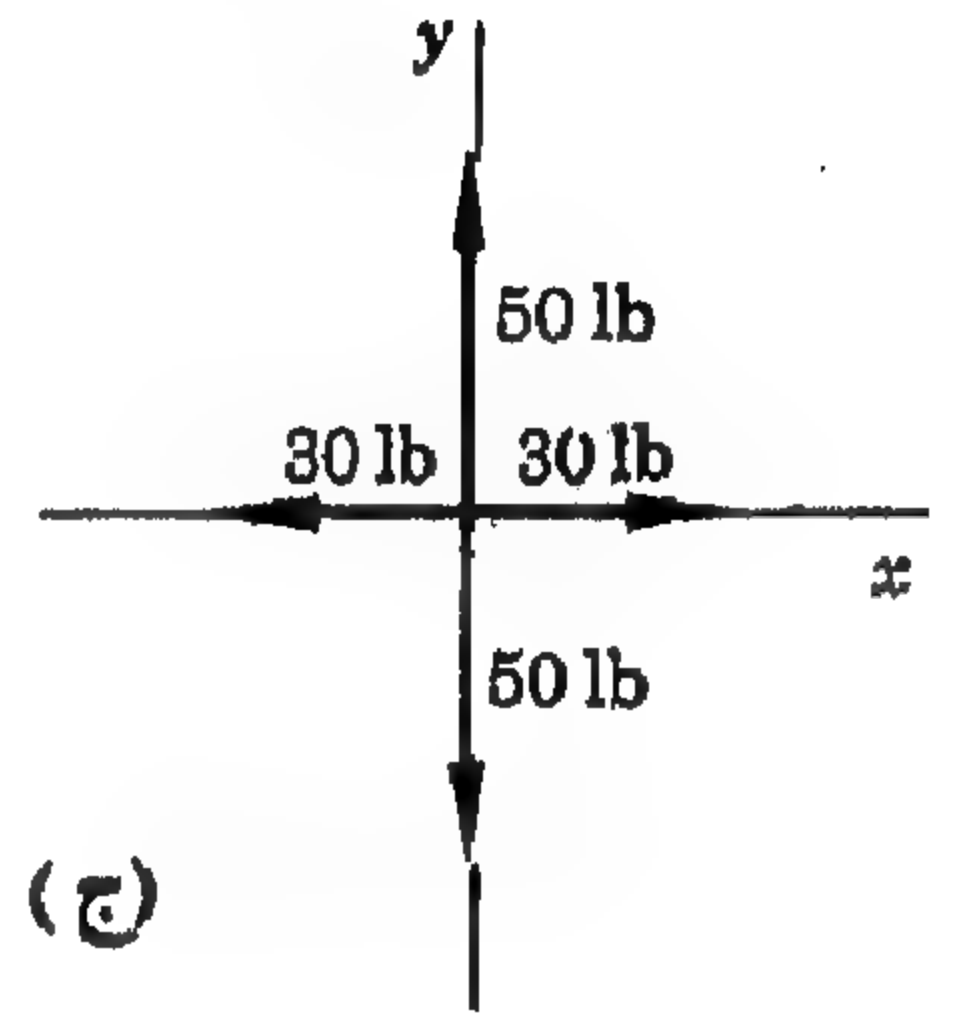
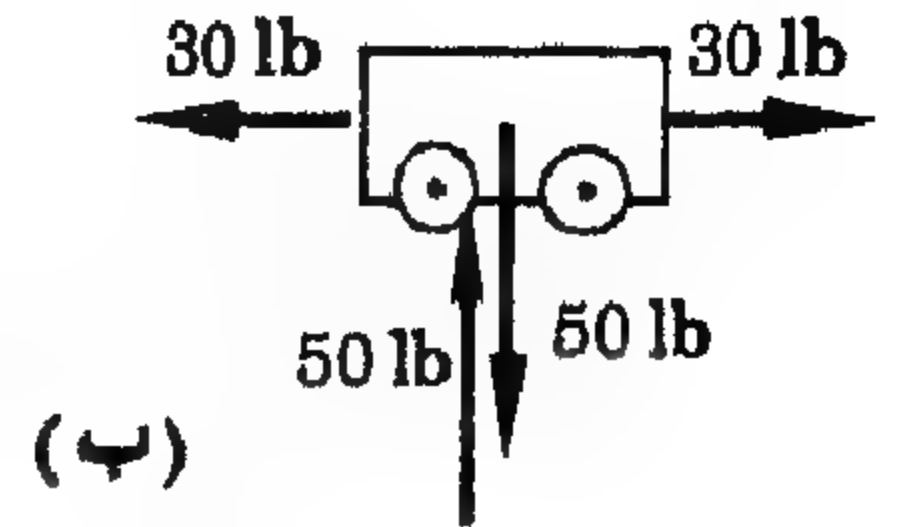
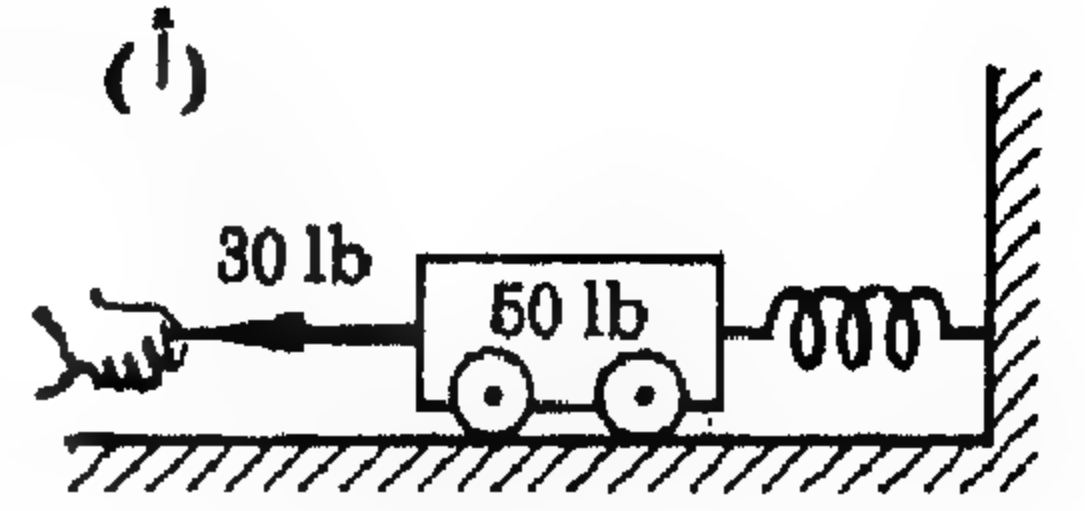
أولا هناك شد الجاذبية الأرضية الى أسفل ومقداره 50 lb . ولكن لابد أن تتزن هذه القوة الى أسفل مع قوة أخرى مساوية لها متجهة الى أعلى والا سقطت العربة الى أسفل . من الواضح أن الطريق الذي تستقر عليه العربة لابد أن يدفعها بقوة تساوي تماما 50 lb بحيث تتزن مع وزن العربة . ومرة أخرى لابد أن تتزن (أو تتساوى) القوى المؤثرة الى أعلى مع القوة المؤثرة الى أسفل حتى تظل العربة ساكنة

هناك أيضا قوتان أخريان تؤثران على العربة ، أولى هاتان القوتان هي القوة التي يجذب الحبل بها العربة الى اليسار ومقدارها 30 lb . ولكن التجربة تخبرنا أنه اذا لم يتزن جذب الحبل مع قوة أخرى مساوية له تجذب العربة الى اليمين فإن العربة لابد ان تتحرك الى اليسار . بناء على ذلك فلكي تظل العربة ساكنة لابد ان يجذب ان الزنبرك هذه العربة الى اليمين بقوة مقدارها 30 lb .

يتضح اذن من خبرتنا العامة أن الجسم المستمر في حالة السكون لابد ألا تؤثر عليه أية قوى غير متزنة . أى أنه من الضروري أن تتعادل جميع القوى المؤثرة عليه الى أعلى مع القوة المؤثرة عليه الى أسفل . كذلك فإن القوى التي تجذبه الى اليمين لابد ان تساوى القوى التي تجذبه الى اليسار . وفي الحقيقة فإن صافي القوة في الاتجاه الثالث ، والتي قد تحاول جذب العربة الى الداخل أو الخارج بالنسبة لمستوى الصفحة في شكل ١ - ١٧ ، لابد ان تساوى صفرا . يمكننا اذن تمثيل القوى المؤثرة على العربة والموضحة في شكل ١ - ١٧ أ رسم بيان الجسم الحز الموضح في شكل ١ - ١٧ ج . لاحظ أن القوة المحصلة المؤثرة على العربة تساوى صفرا .

١ - ٧ : الأجسام المقيدة بحبال أو أسلاك :

لندرس الآن مثالا أكثر تعقيدا لنرى كيف يمكن استخدام قاعدة اتزان القوى .



شكل (١ - ١٧)

عربة صغيرة وزنها 50 lb مثبتة في الحائط بواسطة زنبرك . هناك حبل يجذبها الى اليسار بقوة مقدارها 30 lb . يمثل رسم بيان الجسم الحز (ج) جميع القوى الأربع المؤثرة على الجسم . وحيث أن العربة الصغيرة في حالة توازن فإن القوى الأربع متزنة .

مثال توضيحي ١ - ٨ : اعتبر مصباح الطريق المعلق بواسطة الاسلاك والموضح في شكل ١ - ٨ . أه وزن المصباح (Newton) 500 N* .

طريقة الحل : لاحظ باهتمام أننا سوف نتكلم الآن عن القوى المؤثرة على المصباح . هناك بعض القوى المؤثرة على كثير من الأجسام الموجودة في الشكل ، ولكننا سنهتم فقط بالقوى المؤثرة على المصباح . تؤثر على المصباح قوتان فقط وهما شد الجاذبية الى أسفل ومقداره 500 N وجذب السلك AL الى أعلى ومقداره 500 N وهو يتزن مع القوة الأولى . لاحظ أن القوتين المؤثرتين على المصباح متزنتان تماما ، لذلك فان المصباح يظل في حالة السكون .

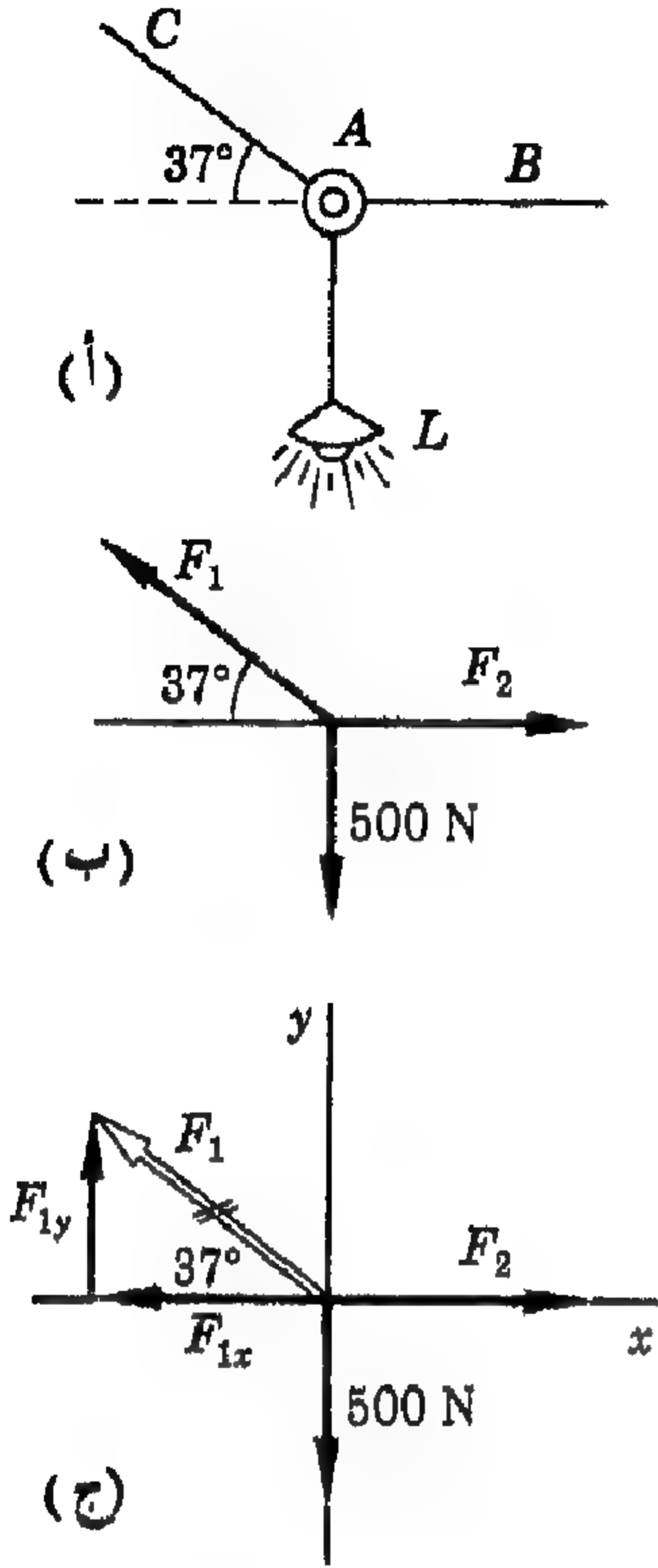
لندرس الآن القوة المؤثرة على طول السلك AL . وحيث أن الأرض تجذب المصباح الى أسفل بقوة قدرها 500 N فان المصباح بدوره يزن 500 N ويؤثر على الحبل AL بقوة قدرها 500 N الى أسفل كذلك فان الحلقة الموجودة عند النهاية العليا A لابد أن تجذب السلك AL الى أعلى بقوة قدرها 500 N حتى تمنعه من السقوط . لذلك فان السلك AL يستمر في حالة السكون لأن القوة 500 N الى أسفل والمؤثرة عند احدى نهايتي السلك تتزن مع القوة 500 N الى أعلى عند النهاية الأخرى له .

لننظر الآن الى الحلقة الموجودة عند النقطة A . هناك ثلاثة أشياء تجذب هذه الحلقة وهي السلك AL والسلك AC والسلك AB . هذه القوى الثلاث المؤثرة على الحلقة موضحة في الشكل ١ - ٨ أ . لاحظ أن هذه القوى ليست على هذه الدرجة من البساطة كتلك القوى المؤثرة على السلك أو المصباح لانها لا تؤثر في اتجاه نفس الخط المستقيم . ومع ذلك فان هذا ليس هاما لأننا نعلم كيف نحلل متجهات القوة الى مركباتها

يمكن اعتبار جذب السلك AC مكونا من جزيين ، جذب الى أعلى وجذب الى اليسار وهذا موضح في شكل ١ - ٨ ب حيث شطب المتجه الأصلي F_1 لنبين أننا قد استعصنا عنه بمركبتيه . والآن أصبح واضحا أن القوتين لابد أن تتزنا ، وعليه فان القوة 500 N الى أسفل تتزن كلية مع مركبة القوة F_1 الى أعلى وهي بالتحديد F_{1y} . أى أن :

$$F_{1y} = 500 \text{ N} \quad (١ - ٢)$$

بالاضافة الى ذلك فان جذب القوة F_2 الى اليمين يجب ان يتزن مع جذب القوة F_{1x} الى اليسار . من هذا نجد أن :



شكل (١ - ٨)

رسمت القوى المؤثرة عند نقطة اتصال الأسلاك الثلاثة والموضحة في (أ) في الجزء (ب) . في الجزء (ج) حسبت مركبات هذه القوى استعدادا لكتابة علاقة التوازن لنقطة الاتصال .

* النيوتن (Newton) هو وحده قوة مثل الباوند (Pound) وسوف نتعرف عليه بتفصيل أكثر في الفصل الثالث . أما الآن فيكتفينا أن نعرف $1 \text{ lb} = 4.45 \text{ N}$. وعليه فان الجسم المعنى يزن 500 N مايعادل 112 lb .

(٣ - ١)

$$F_{1x} = F_2$$

ولسوء الحظ فإن F_{1x} لازالت غير معلومة ، لذلك فلن يمكن حساب F_2 الا بعد ايجاد F_{1x} . ومع ذلك فيمكن القيام بذلك بسهولة اذا لاحظنا أن تعريف ظل الزاوية في هذه الحالة يعطينا

$$\tan 37^\circ = \frac{F_{1y}}{F_{1x}}$$

$$(٤ - ١) \quad F_{1x} = \frac{F_{1y}}{\tan 37^\circ} = \frac{500 \text{ N}}{0.75} = 670 \text{ N} \quad \text{أو :}$$

حيث استخدمنا حقيقة أن ظل الزاوية 37° هو 0.75 . ومن المعادلة (٣ - ١) نجد كذلك أن $F_2 = 670 \text{ N}$.

وإذا أردنا إيجاد الشد في السلك AC وليس مركبته يمكننا أن نكتب :

$$F_1 = \sqrt{F_{1x}^2 + F_{1y}^2}$$

$$= \sqrt{(670 \text{ N})^2 + (500 \text{ N})^2} = 830 \text{ N}$$

وبطريقة أخرى يمكننا أن نلاحظ بكثير من البساطة أن تعريف جيب الزاوية يمكن وضعه في هذه الحالة على الصورة :

$$\sin 37^\circ = \frac{F_{1y}}{F_1}$$

$$(٥ - ١) \quad F_1 = \frac{F_{1y}}{\sin 37^\circ} = \frac{500 \text{ N}}{0.60} = 830 \text{ N} \quad \text{ومنه نجد أن :}$$

أي أننا قد تمكنا من إيجاد الشد في كل حبل والقوى المؤثرة على مختلف الأجسام بتطبيق فكرة اتزان القوى

١ - ٨ الشرط الأول للتوازن

لكي يستمر الجسم في حالة السكون لابد من تحقق شرطين أساسيين ، وقد استخدمنا الشرط الأول للتوازن في الأجزاء السابقة ، أما الشرط الثاني فانه يتعلق بدوران الجسم وسيناقش في الفصل الثامن ونفرض عدم دوران الجسم فانه سيستمر ساكنا بشرط اتزان القوى المؤثرة على هذا الجسم . بناء على ذلك يمكننا صياغة الشرط الأول للتوازن على هذه الصورة المبسطة . لابد أن تتزن القوى المتجهة الى أعلى مع القوى المتجهة الى أسفل ، وايضا لابد أن تتزن القوى المتجهة الى اليسار مع القوى المتجهة الى اليمين . وبالرغم من أن ذلك صحيح بالتأكيد ، وبالرغم أيضا من أن ما نعينه واضح لنا كل الوضوح فان هذه الصيغة ليست دقيقة ومضبوطة تماما من الناحية العلمية ولكن من الممكن تحسينها اذا عبرنا عنها بدلالة اتجاهات الاحداثيات الثلاثة x و y و z .

ما نعينه في الحقيقة هو انه اذا أثرت قوة مقدارها 20 lb على الجسم في الاتجاه الموجب من المحور x فلا بد أن تؤثر عليه قوة أخرى مقدارها 20 lb في الاتجاه السالب من المحور x حتى يكون الجسم في حالة توازن . وإذا اتفقنا على تسمية القوة المؤثرة على الجسم في الاتجاه الموجب بالمقدار +20 والقوة المؤثرة عليه في الاتجاه السالب بالمقدار -20- فسيمكننا صياغة شرطنا بمنتهى البساطة بأن نقول أن « مجموع القوى في اتجاه المحور x تساوى صفراً » وباستخدام الرمز الرياضى ΣF_x بدلا من العبارة « مجموع القوى في اتجاه المحور x » فان الشرط الأول الضروري للتوازن يمكن كتابته على الصورة* :

$$\text{عند التوازن : } \Sigma F_x = 0 \quad \Sigma F_y = 0 \quad (1 - 6 \text{ أ})$$

يمكن تبسيط هاتين المعادلتين أكثر من ذلك بملاحظة أنها تنص على مجرد أن محصلة جميع القوى المؤثرة على الجسم لابد أن تساوى صفراً . وهذا يعنى أن مجموع كل القوى الموجهة المؤثرة على الجسم يساوى صفراً . وبالتالي فان :

$$\Sigma F = 0 \quad (1 - 6 \text{ ب})$$

تمثل المعادلتان (1 - 6) الصيغة الرياضية للشرط الأول للتوازن . ومن الضروري أن نتذكر دائما أنها تنطبق على جسم واحد معزول في وقت معين . وهى تنطبق على القوى المؤثرة على ذلك الجسم ، ولكننا يجب أن نكون مستعدين دائما لأن نقول بأى طريقة تؤثر كل قوة على الجسم المعزول للدراسة . فهى يمكن أن تكون شد الحبل أو جذب الجاذبية أو دفع المنضدة أو دفع العمود أو أى طريقة فيزيائية مشابهة لتأثير القوة على الجسم المعنى .

١ - ٩ حل المسائل في علم الاستاتيكا

يمكن بقليل من التمرين أن يصبح حل كثير من المسائل في علم الاستاتيكا (أى دراسة الاجسام في حالة السكون) باستخدام المعادلات (1 - 6) اسلوبا روتينيا تقريبا . ولكن من الضروري اتباع بعض القواعد البسيطة حتى لا يختلط علينا الأمر :

١ - اعزل الجسم . ما هى النقطة أو الجسم الذى سوف نتحدث عنه ؟

القوى المؤثرة على هذا الجسم هى فقط تلك القوى التى تلزم لكتابة

المعادلات (1 - 6) .

* هذا يفرض أن جميع القوى ليست لها مركبات في اتجاه المحور z . أما اذا وجدت قوى مؤثرة في الاتجاه z فيجب اضافة

$\Sigma F_z = 0$ الى شروط التوازن المذكورة في المعادلات (1 - 6) .

٢ - ارسم القوى المؤثرة على الجسم الذى عزلته، ثم ميزها بعلامات مناسبة (واذا لم تكن مقادير هذه القوى معلومة يمكن الرمز اليها بحروف مثل F_1 ، F_2 ، الخ) ، سنسمى هذا الرسم برسم بيان الجسم الحر .

٣ - قسم كل من القوى الى مركباتها فى الاتجاهات x ، y ، ثم ميز هذه المركبات بدلالة الرموز المعطاه فى القاعدة ٢ واستخدام جيوب أو جيب تمام الزاوية المناسبة .

٤ - اكتب المعادلات (١ - ٦) .

٥ - حل المعادلات بالنسبة للمجهول .

مثال توضيحي ١ - ٩ : لتوضيح هذه الطريقة سنبين كيف يمكننا ايجاد الشد فى كل من الحبال الموضحة فى شكل ١ - ١٩ أ . (تذكر أن الشد فى حبل هو القوة التى يجذب بها الحبل الجسم المتصل به) .

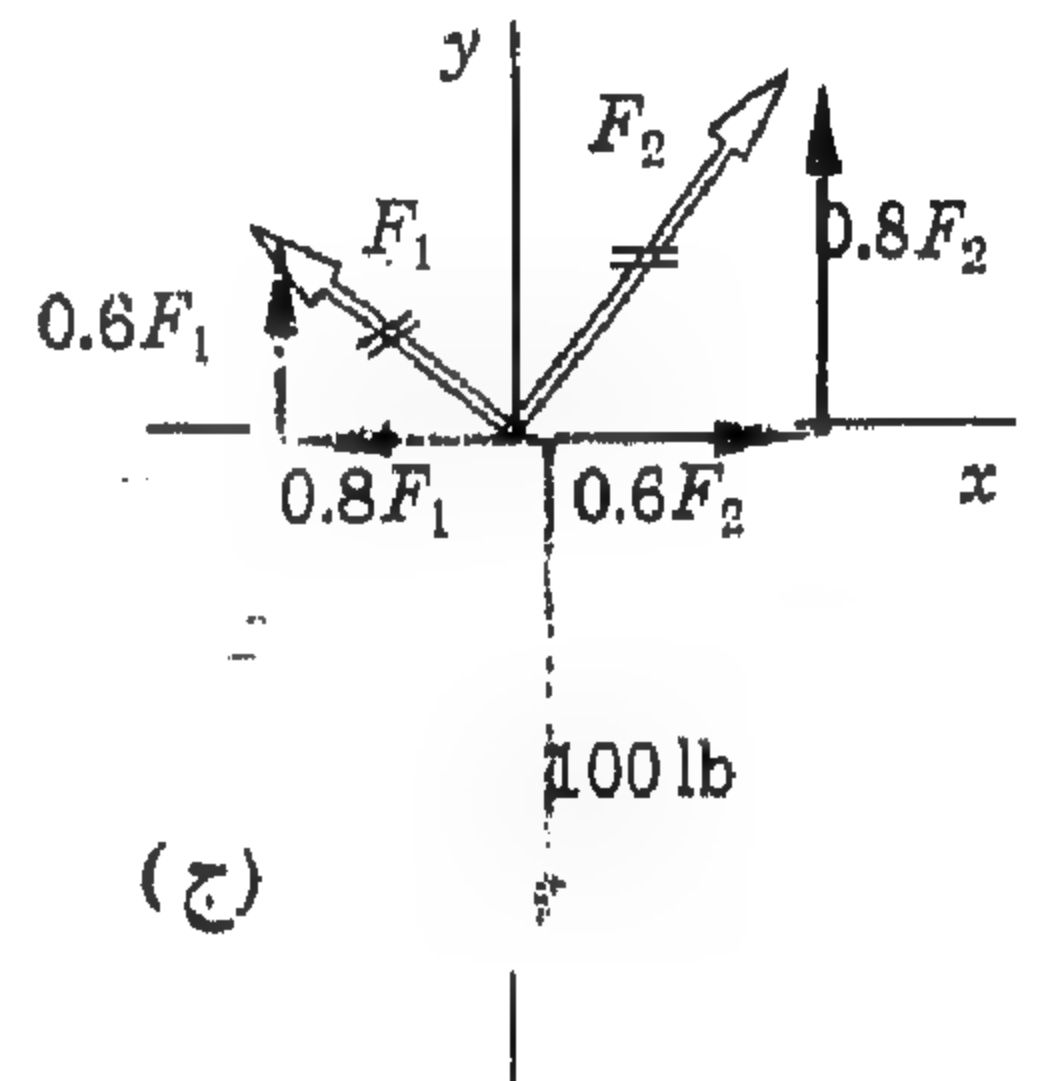
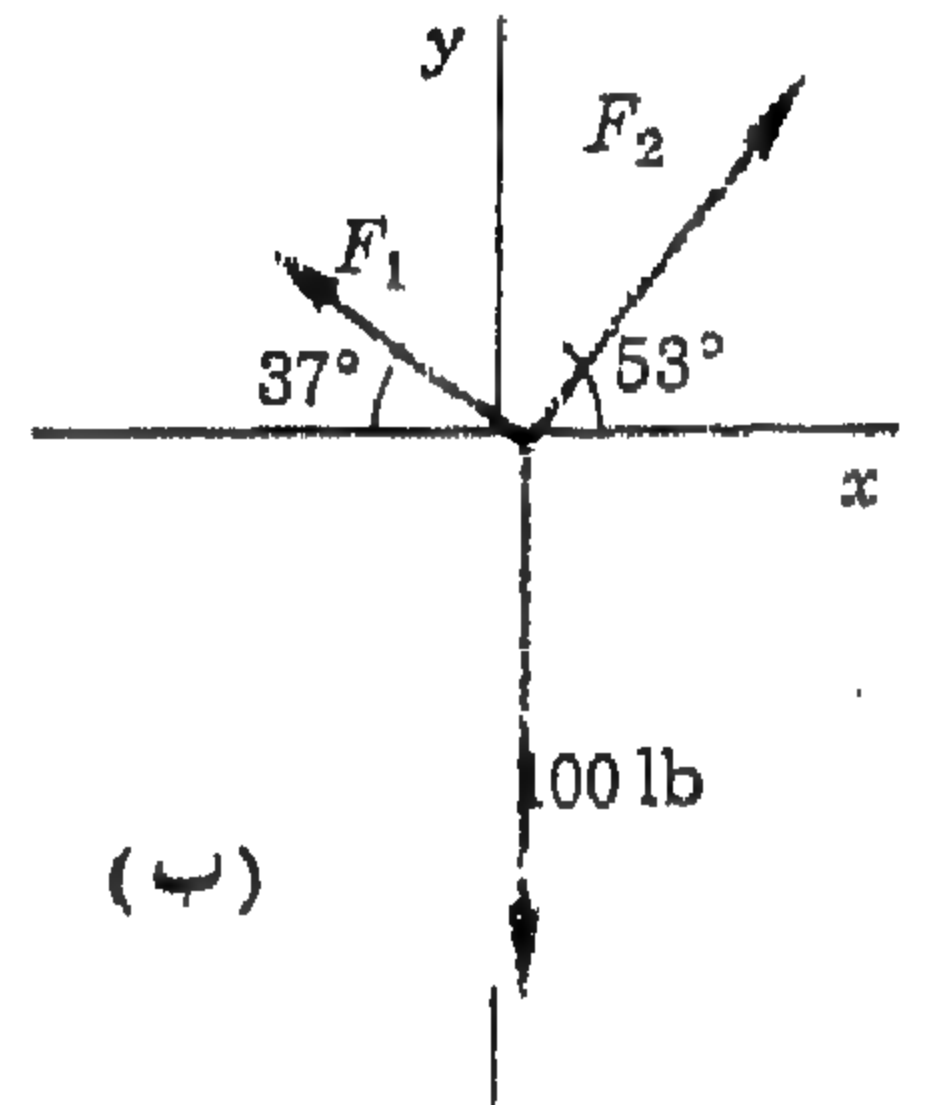
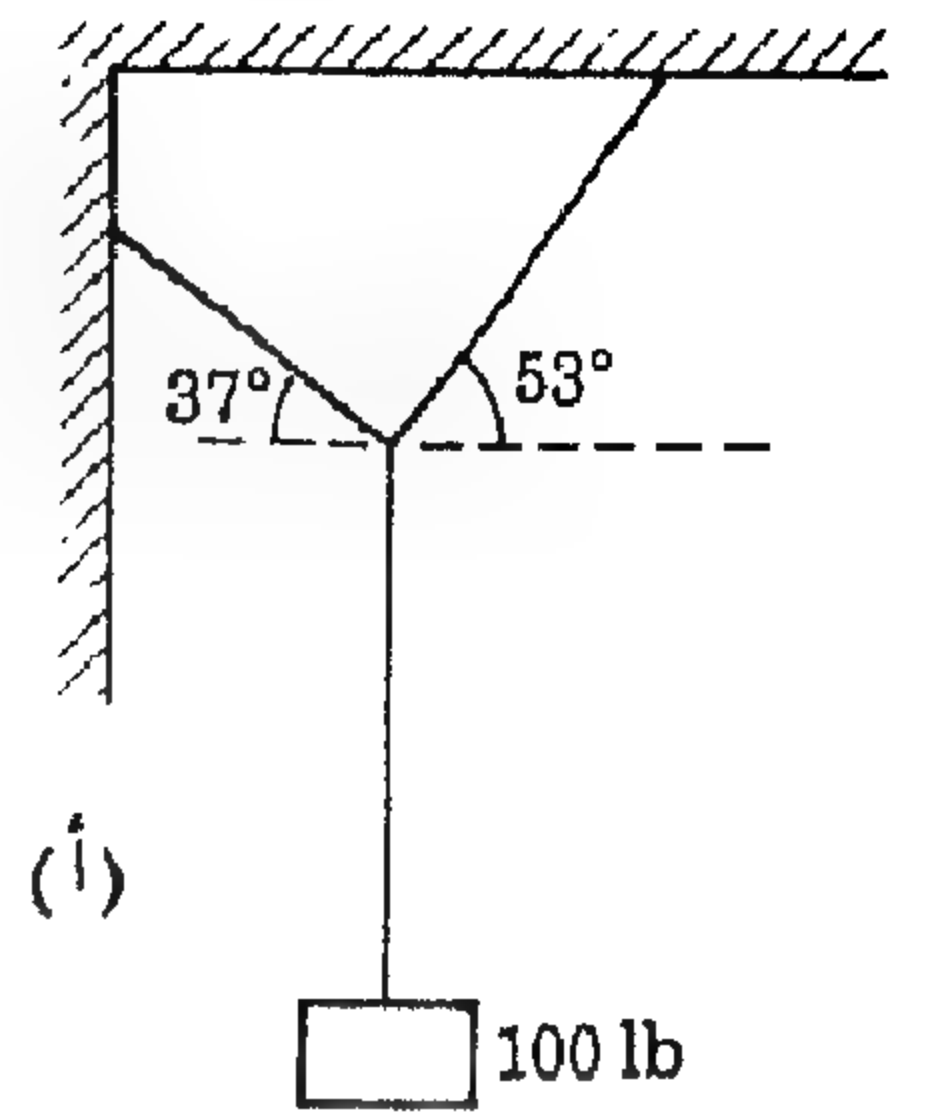
طريقة الحل : نعلم من اللحظة الأولى أن الشد فى الحبل السفلى هو 100 lb لأنه يحفظ الجسم الثقيل فى مكانه . سنعتبر أن نقطة اتصال الحبال الثلاثة هى الجسم (أو النقطة) التى سوف نعزلها ، ومن المعقول اختيار هذه النقطة لأن احدى القوى المؤثرة عليها معلومة مقدما بينما القوتان الأخريان هما القوتان المطلوب ايجادهما بالفعل .

لقد نفذنا الخطوة ٢ من طريقة الحل فى الجزء ب من شكل ١ - ١٩ ، بينما نفذت الخطوة ٣ من الجزء ج من نفس الشكل . وقد كان من الممكن القيام بذلك مباشرة فى الجزء ب من الشكل ، ولكننا فضلنا فصل القوتين هنا لزيادة التوضيح . بالإضافة الى ذلك كتبنا $F_1 \sin 37^\circ$ على الصورة $0.60 F_1$ لأن $\sin 37^\circ$ تساوى 0.60 ، كما استخدم نفس الاسلوب للتعبير عن المركبات الأخرى* .

نحن الآن مستعدون لتنفيذ الخطوة ٤ . وبمجرد النظر الى شكل ١ - ١٩ ج سنجد أن :

$$\Sigma F_x = 0: \quad 0.60 F_2 - 0.80 F_1 = 0 \quad (٧ - ١)$$

$$\Sigma F_y = 0: \quad 0.80 F_2 + 0.60 F_1 - 100 = 0 \quad (٨ - ١)$$



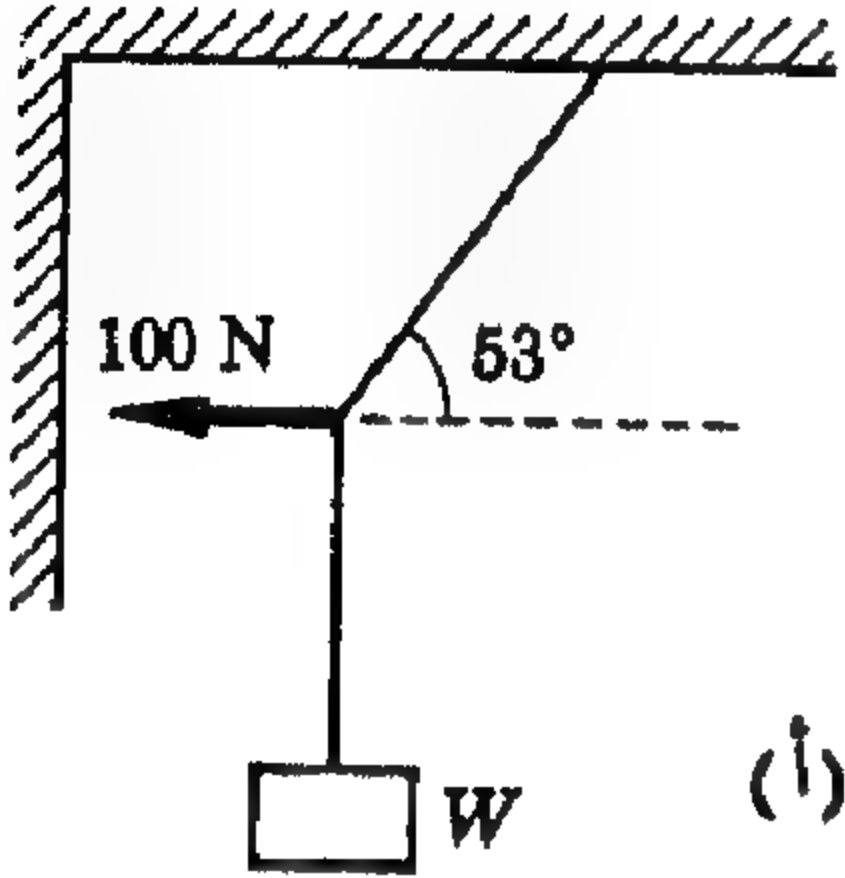
شكل (١ - ١٩)
حيث أن نقطة اتصال الحبال فى (أ) موجودة فى حالة التوازن فان القوى x لابد أن تتلاشى فى (ج) . وهذا صحيح أيضا بالنسبة الى القوى y .

* من الملائم استخدام الزاوية 37° و 53° فى الأمثلة التوضيحية لأن $\sin 37^\circ = \cos 53^\circ = 0.60$ وكذلك $\cos 37^\circ = \sin 53^\circ = 0.80$ وبذلك لن نضطر الى الرجوع الى جداول السبب المثلثية . ويسمى المثلث القائم الراوية ذى الحادتين 37° و 53° بالمثلث قائم الزاوية ٣ - ٤ - ٥ لان أطوال اضلاعه تتناسب مع هذه الاعداد .

حيث حذفنا وحدات المقدار 100 وهي (lb) لتبسيط المعادلة .

لتنفيذ الخطوة ٥ يجب حل هاتين المعادلتين بالنسبة الى F_1 و F_2 . تذكر من راسك في علم الجبر أن هناك طريقتين عامتين للحل .

الطريقة الاولى : اضرب المعادلة (١ - ٧) في 0.6 والمعادلة (١ - ٨) في 0.8 .



(١ - ٩)

$$0.36F_2 - 0.48F_1 = 0$$

$$0.64F_2 + 0.48F_1 - 80 = 0$$

بجمع المعادلتين نحصل على :

$$F_2 = 80 \text{ lb} \quad \text{أو} \quad 1.00F_2 - 80 = 0$$

بالتعويض في المعادلة (١ - ٩) نحصل على :

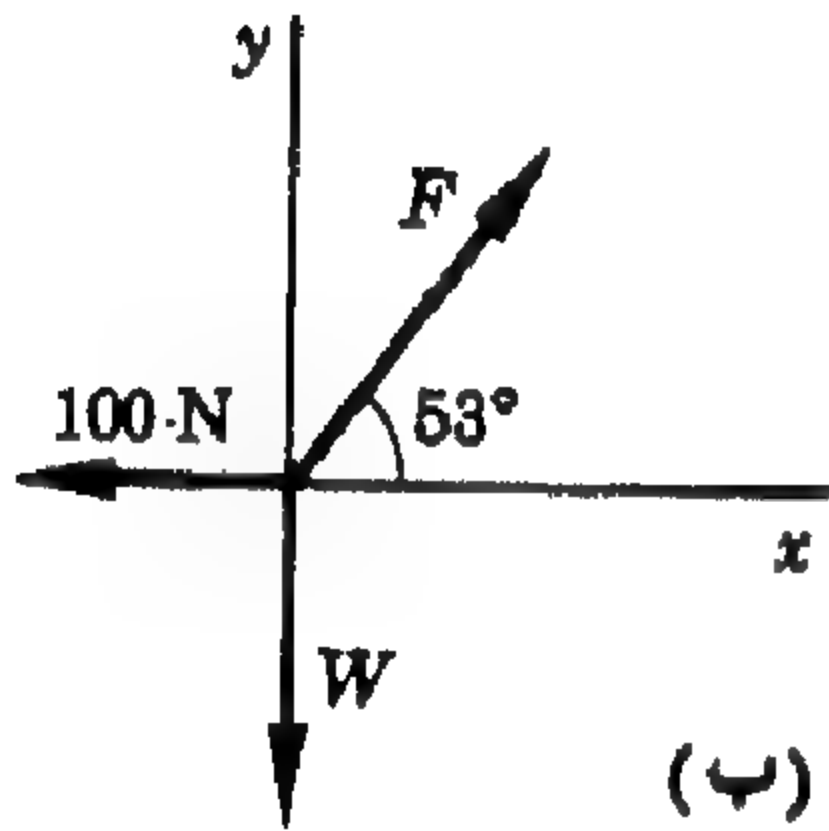
$$F_1 = 60 \text{ lb} \quad \text{أو} \quad 0.48F_1 = (0.36)(80)$$

وبالتعويض عن هذه القيم في المعادلة (١ - ٨) نجد أن :

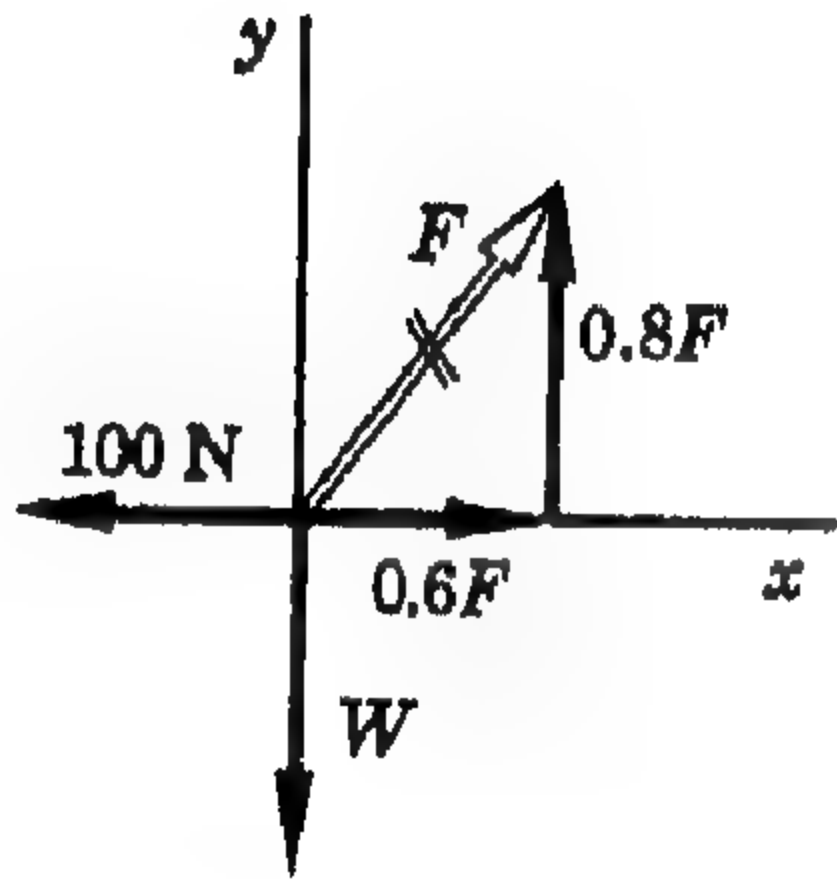
$$F_2 = 80 \text{ lb} \quad \text{أو} \quad 0.80F_2 + (0.60)(0.75)(F_2) - 100 = 0$$

وباستخدام المعادلة (١ - ١٠) :

$$F_1 = 60 \text{ lb}$$



(ب)



(ج)

تتلخص الفيزياء المستخدمة في إيجاد الشد في الحبال أساسا في رسم القوى وإيجاد مركباتها وتطبيق قاعدة التوازن . ويلاحظ أن الجزء الأكبر من العمل يرتبط بعلم الجبر ويستخدم لحل المعادلات الآتية لإيجاد المجاهيل . ولكن لا تسمح للجبر أن يربكك فان مثل هذه المسائل مباشرة تماما ولا يجب أن تمثل أية صعوبة . وستتعلم في الفصل التالي كيف نصف حركة الأجسام وسنرى في الفصل الثالث كيف تسبب القوى المؤثرة على الأجسام حركتها .

مثال توضيحي ١ - ١٠ : اوجد وزن الجسم والشد في الحبل العلوي بالنسبة للمثال الموضح في شكل ١ - ٢٠ . لاحظ أن الشد في الحبل الأفقي معلوم ويساوي 100 N .

طريقة الحل : لإيجاد الشد في الحبل تختار نقطة اتصال الحبال الثلاثة لتمثل الجسم المعنى . لنعزل الآن هذا الجسم ونرسم رسم بيان الجسم الحر المناسب كما في شكل ١ - ٢٠ ب . تحلل القوى كما في الجزء ج .

بكتابة شروط التوازن نحصل على :

شكل (١ - ٢٠)
حيث أن الشد في الحبل الأفقي معلوم ويساوي 100N
فان المسألة تتلخص في تعيين قيمة W/يمثل الجزءان (ب) و (ج) رسمى بيان القوى المناسبين .

$$\Sigma F_x = 0:$$

$$\Sigma F_y = 0:$$

$$0.60F - 100 = 0$$

$$0.80F - W = 0$$

بحل أولى هاتين المعادلتين نجد أن $F = 167 \text{ N}$. وبالتعويض عن هذه القيمة في المعادلة الثانية نحصل على $W = 133 \text{ N}$.

ملخص :

الكميات الموجهة لها مقدار واتجاه معا . الكميات غير الموجهة ليس لها اتجاه . يمكننا تمثيل الكمية الموجهة بسهم يسمى متجه . يتناسب طول المتجه مع مقدار الكمية الموجهة في اتجاه المتجه هو اتجاه الكمية الموجهة .

لجمع مجموعة من المتجهات بيانيا ترسم هذه المتجهات طرفا في طرف . يوضع ذيل المتجه الثانى فوق رأس المتجه الأول ، ويوضع ذيل المتجه الثالث فوق رأس المتجه الثانى وهكذا دواليك . المتجه المحصل هو ذلك السهم الذى ينطبق ذيله على ذيل المتجه الأول وينطبق رأسه على رأس المتجه الأخير .

لجمع مجموعة من المتجهات باستخدام طريقة المركبات المثلثية يجب أولا إيجاد المركبات المتعامدة لكل متجه ، ويتم ذلك باستخدام الطريقة المثلثية الموضوعة في الجزء ١ - ٤ . توجد المركبة x للمحصلة بإيجاد المجموع الجبرى للمركبات x لجميع المتجهات . ونفس الطريقة يمكن إيجاد المركبة y للمحصلة . ثم تطبق العلاقتان :

$$\tan \theta = \frac{R_y}{R_x} \quad ; \quad R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

حيث θ هي الزاوية التى تصنعها المحصلة مع المحور x .

لكى يكون الجسم فى حالة توازن لابد أن تكون القوة المحصلة المؤثرة عليه مساوية للصفر . ويمكن التعبير عن ذلك رياضيا بالمعادلة :

$$\Sigma F = 0$$

كذلك يمكن التعبير رياضيا عن هذا الشرط بدلالة مركبات القوى المؤثرة على الجسم على الصورة :

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma F_y = 0 \quad \Sigma F_z = 0$$

ويسمى هذا الشرط بالشرط الأول للتوازن . هناك أيضا شرط ضرورى ثان للتوازن وهو يتعلق بالقوى التى يمكن أن تسبب دوران الجسم .

لحل المسائل المتعلقة بالأجسام فى حالة التوازن يجب اتباع الخطوات الخمس للطريقة المذكورة فى الجزء ١ - ٩ بالترتيب .

الحد الأدنى من الاهداف التعليمية* :

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل التالى :

- ١ - شرح الفرق بين الكميات الموجهة وغير الموجهة وإعطاء أمثلة لكل منها .
- ٢ - رسم رسم بيان المتجهات التى تمثل سلسلة من الإزاحات التى تقوم أنت بوصفها .
- ٣ - إيجاد محصلة مجموعة من المتجهات برسمها بيانيا باستخدام مقياس رسم مناسب .
- ٤ - شرح معنى الشد فى خيط أو حبل .
- ٥ - تعريف $\sin \theta$ و $\cos \theta$ و $\tan \theta$. إيجاد الجيب وجيب تمام والظل لزاوية معلومة باستخدام جداول النسب المثلثية .
- ٦ - استخدام حساب المثلثات لإيجاد أطول الأضلاع والزوايا المجهولة فى مثلث قائم الزاوية .

* لاحظ كلمتى الحد الأدنى . نتحتم أن يحقق جميع الطلاب هذه الأهداف .

- ٧ - إيجاد المركبات المتعامدة لمتجه معلوم ، أو إيجاد المتجه وزاويته بمعلومية مركبتى هذا المتجه .
- ٨ - جمع مجموعة من المتجهات باستخدام طريقة المركبات المثلثية .
- ٩ - صياغة الشرط الأول للتوازن فى صورة كلمات ومعادلات ، تبين ما إذا كانت القوى المؤثرة على الجسم تحقق هذا الشرط .
- ١٠ - استخدام الشرط الأول للتوازن فى حل المسائل البسيطة مثل تلك المعطاه فى الجزء ١ - ٩ .
- ١١ - اعطاء أمثلة لمسافات تساوى تقريبا 1 mm ، 1 cm ، 1 km .
- ١٢ - التعبير عن وزنك بالتقريب بالنيوتن .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تستطيع تعريف أو شرح كل من الآتى :

الكمية غير الموجهة	الطريقة المثلثية لجمع المتجهات
الكمية الموجهة	متجه القوة
متجه الازاحة	النيوتن (وحدة)
نظرية فيثاغورث	الشد فى خيط
المتجه المحصلة	وزن جسم ما
الطريقة البيانية لجمع المتجهات	رسم بيان الجسم الحر
الجيب وجيب التمام والظل	عزل جسم ما
المركبات المتعامدة للمتجه	الشرط الأول للتوازن

أسئلة وتخمينات

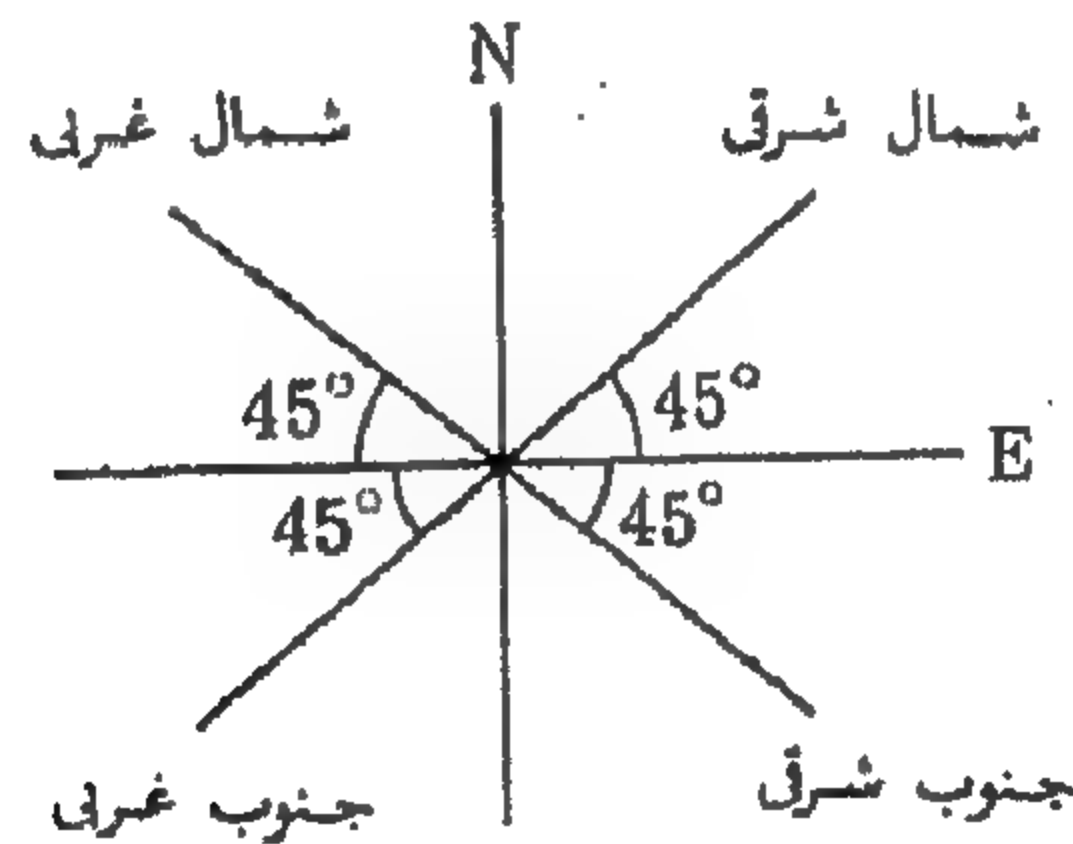
- تطلب الأسئلة ذات العلامة (ق) أن تعطى تقديرا مبنيا على خبرتك الخاص .
- ١ - أى من الكميات التالية يمكن أن تمثل بمتجه : (أ) قوة الجاذبية الأرضية ، (ب) عدد السكان فى مدينة ، (ج) سرعة الرياح ، (د) حركة القارب ، (هـ) عدد الكتب على رف ، (و) تدفق الماء فى ماسورة ؟
- ٢ - هل تستطيع قوة متجهة الى الشرق أن تتزن مع قوة متجهة الى الشمال ؟
- ٣ - هل يمكن الحصول على قوة متجهة شمالا تماما بتراكب قوة متجهة ناحية الشمال الشرق وقوة مساوية لها متجهة الى الشمال الغربى ؟ وماذا يحدث اذا كانت هاتان القوتان غير متساويتين ؟
- ٤ - بين فى أى اتجاه يجب أن تتجه ثلاث متجهات متساوية المقدار بحيث يكون مجموعها مساويا للصفر . هل يمكن تحقيق ذلك بأكثر من طريقة ؟ هل يمكن تحقيق ذلك اذا كانت المتجهات الثلاثة غير متساوية ؟ هل يتحقق ذلك بقوتين غير متساويتين فى المقدار ؟
- ٥ - تسبب اشارات المرور الضوئية المعلقة فى أسلاك ممتدة عبر الطريق ارتخاء هذه الاسلاك . لماذا لا يزيل العمال هذا الارتخاء عندما يضبطون هذه الأسلاك ؟
- ٦ - تحمل انثى القطط طفلها الصغير بامساكه بفمها من الجلد خلف الرقبة ورفع . نصف تأثير القوى المشتركة فى العملية وبين أن هذه الطريقة أفضل من طرق أخرى مثل جذب القط الصغير من أطرافه مثلا .
- ٧ - مثل كل شخص فى مدينة عدد سكانها 200,000 نسمة بمتجه يمتد من طرف الأنف الى إخمض القدم قدر محصلة هذه المتجهات (أ) فى الساعة ١٢ ظهرا ، (ب) عند منتصف الليل . كرر العمل اذا كان المتجه يمتد من الأذن اليمنى الى الأذن اليسرى (ق) . (يجب تقدير متوسط المسافة من طرف الأنف الى إخمض القدم وكذلك عدد الأشخاص الواقفين) .

- ٨ - يقوم اللاعبون في سيرك عادى باداء لعبة الهرم الآدمى . ويتم ذلك بأن يقف ثلاثة بهلوانات على الأرض جنباً الى جنب ، ثم يقف بهلوانان على أكتافهم وأخيراً يقف بهلوان واحد على كتفى هذين الاثنين . قدر (أ) القوة المؤثرة على كتفى البهلوان السفلى الأوسط ، (ب) القوة التى يؤثر بها كل من قدميه على الأرض . هل تعتمد اجابتك على ما اذا كانت البهلوانات السفلى الثلاثة تقف متلاصقة أم لا ؟ (ق) .
- ٩ - يرفع لاعب فى جزء من دوره على الأرض بشد شعر رأسه ببطء الى أعلى ولكن لسوء الحظ اصيب هذا اللاعب بالصلع السريع . ما هو بالتقريب عدد الشعرات الذى يجب أن يبقى على رأسه حتى يؤدي دوره بامان (ق) (يجب تقدير قوة الشعرة الواحدة) .

مسائل :

تحل المسائل ذات الرمز (ب) بيانياً ، وتحل جميع المسائل الأخرى باستخدام علم حساب المثلثات .

- ١ - (ب) يقع بيتى على بعد ستة صفوف من البيوت والمحلات التجارية المتلاصقة شرقاً وثمانية صفوف من البيوت والمحلات التجارية المتلاصقة شمالاً بالنسبة الى المبنى الذى أعمل فيه . ما هى المسافة الخطية المستقيمة بين هاتين النقطتين . ما هى المسافة الخطية المستقيمة بين هاتين النقطتين . ماهى الزاوية التى يصنعها هذا الخط المستقيم مع الاتجاه الشرق ؟
- ٢ - (ب) ما هى المسافة الخطية المستقيمة بين نقطتين اذا كانت احدهما تقع على بعد 20 km شرقاً 16 km شمالاً بالنسبة الى النقطة الأخرى ؟ ماهى الزاوية التى يصنعها هذا الخط مع الاتجاه الشرق ؟
- ٣ - (ب) اذا طارت طائرة مسافة 100 km فى الاتجاه الجنوبى الغربى فما هى المسافة التى قطعتها الطائرة غرباً والمسافة التى قطعتها جنوباً (انظر شكل ١٣ - ١) ؟
- ٤ - (ب) تقع ديترويت على مسافة 110° mi تقريباً شمال غرب واشنطن . على أى مسافة تقع واشنطن جنوبى ديترويت (انظر شكل م ١ - ١) ؟
- ٥ - (ب) أعطيت الإزاحات التالية الى جهاز تحديد الموضع فى مخرطة نضدية : 5.0 cm بزاوية 0° ، 12.0 cm بزاوية 80° ، 7.0 cm بزاوية 110° ، 9.0 cm بزاوية 210° . وتقاس جميع الزوايا بالنسبة للمحور x عكس اتجاه دوران عقارب الساعة . (انظر شكل م ١ - ٢) للإزاحة 7.0 cm بزاوية 110° . احسب مقدار وزاوية الإزاحة المحصلة .



- ٦ - (ب) تقع النقطة B على بعد 300 Km من النقطة A فى اتجاه 50° شمال الشرق ، ويمتد طريق مسافة 40 Km إلى الشرق من النقطة A ثم ينتهى . فاذا بدأت من نهاية الطريق فما هى المسافة وبأى زاوية من الاتجاه الشرق يجب ان تسافر حتى تصل الى النقطة B ؟
- ٧ - لكى يصل المرء من ميامي الى شيكاغو يجب أن يطير حوالى 1100 mi بزاوية قدرها 30° غرباً بالنسبة الى الشمال . على أى مسافة تقع شيكاغو شمال ميامي ؟ وعلى أى مسافة تقع غرباً ؟
- ٨ - تؤثر قوة مقدارها 50 N فى اتجاه يصنع زاوية قدرها 110° مع الاتجاه الموجب من المحور x فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة (انظر شكل م ١ - ٢) . ماهى المركبة x لهذه القوة ؟ وماهى المركبة y ؟
- ٩ - اوجد محصلة القوى الموضحة فى شكل م ١ - ٣ . اوجد الزاوية التى تصنعها المحصلة فى عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للمحور x .
- ١٠ - اوجد محصلة القوى الموضحة فى شكل م ١ - ٤ . اوجد الزاوية التى تصنعها المحصلة فى عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للمحور x .

١١ - كسرت ساق طالب في حادثة ثم نقل الى المستشفى حيث وضعت ساقه في الجبس وعملت كما هو موضح في شكل م ١ - ٥ .
وبفرض ان البكرات لا احتكاكية فإن الشد في الحبل سيكون متساويا في جميع أجزائه ، وبالتحديد 7.0 lb . ما هي القوة التي تمد ساق الطالب ؟ وما هي القوة التي يؤثر بها الجهاز على قدمه وساقه معا ؟

١٢ - اوجد محصلة القوى الثلاث الآتية : 10.0 N بزاوية 30° ، 20.0 N بزاوية 90° ، 30 N بزاوية 250° . تقاس جميع الزوايا عكس اتجاه دوران عقارب الساعة بالنسبة للاتجاه الموجب للمحور x . ماهو مقدار واتجاه القوة التي تتزن مع هذه القوى الثلاث ؟

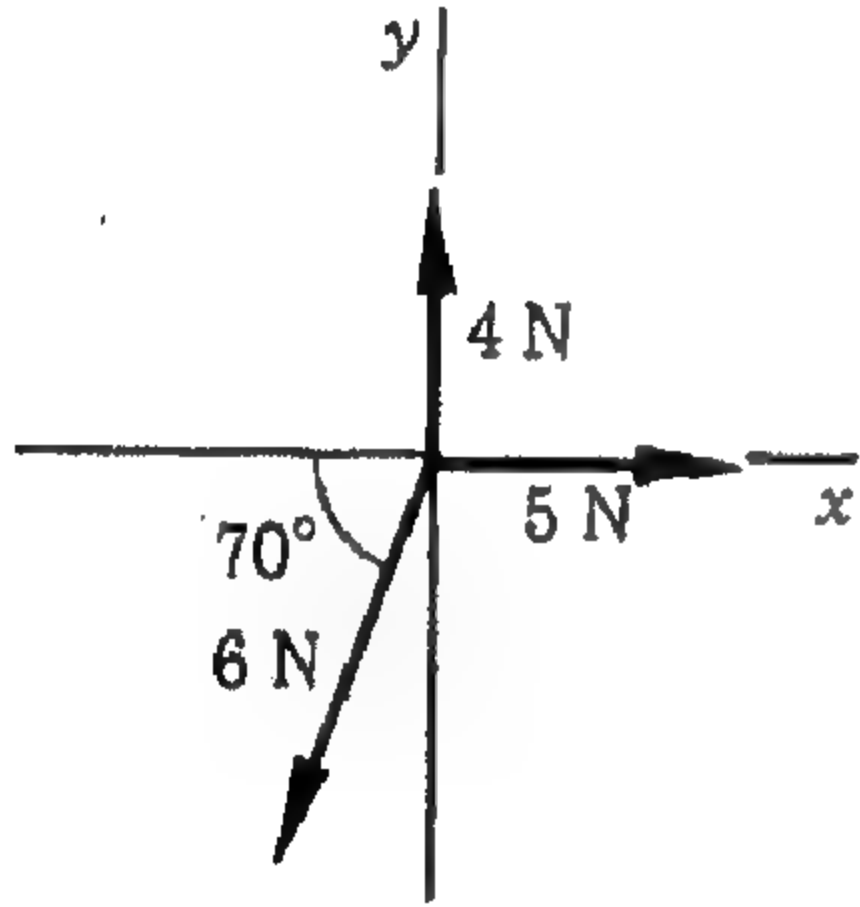
١٣ - تؤثر قوة مقدارها 20.0 lb في اتجاه يصنع زاوية قدرها 270° مع الاتجاه الموجب للمحور x (تقاس الزوايا في عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للاتجاه الموجب للمحور x) . وتتنزن هذه القوة مع قوتين احدهما 150 lb بزاوية قدرها 90° والاخرى مجهولة . اوجد مقدار واتجاه القوة المجهولة .

١٤ - تستقر حشرة على لوح خشبي طاف على سطح مجرى مائي ويتحرك في خط مستقيم مع التيار في الاتجاه الجنوبي بسرعة قدرها 5.0 cm/s (centimeters per second) أي خمس سنتيمترات في الثانية . فاذا تحركت الحشرة على اللوح في عكس اتجاه التيار (أي

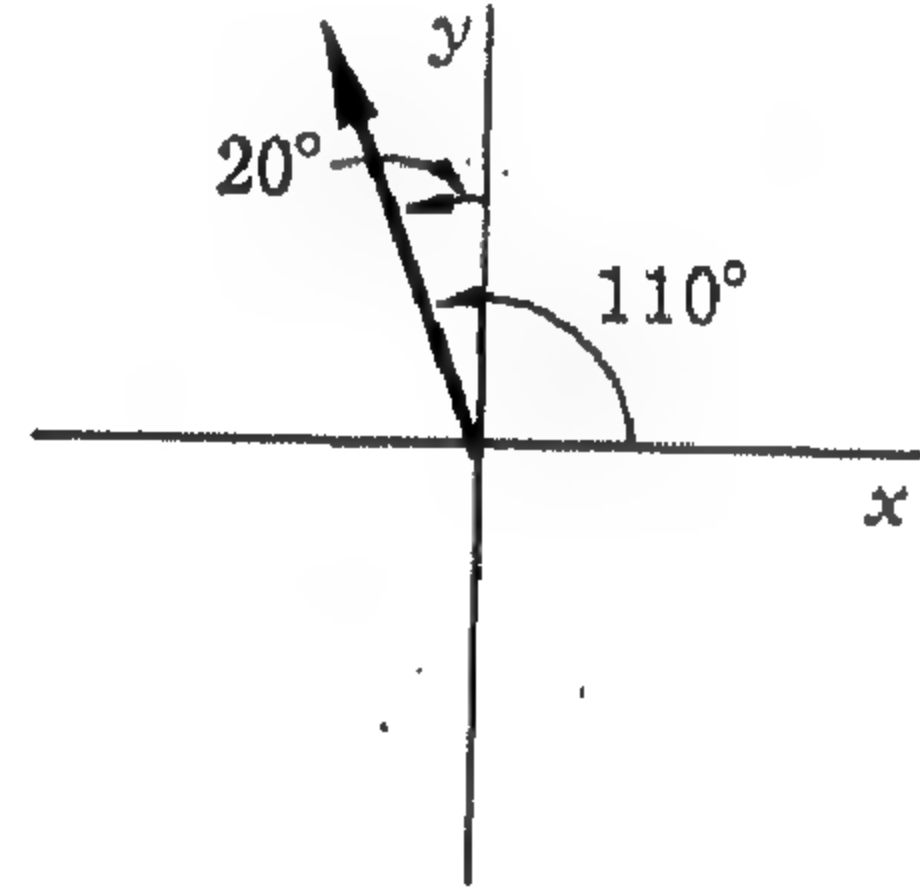
شمالا) بسرعة قدرها 3.0 cm/s فما هي سرعة الحشرة بالنسبة لشاطئ المجرى المائي ؟

*١٥ كرر المسألة ١٤ اذا كانت الحشرة تسير بنفس السرعة على اللوح ولكن في اتجاه الشرق .

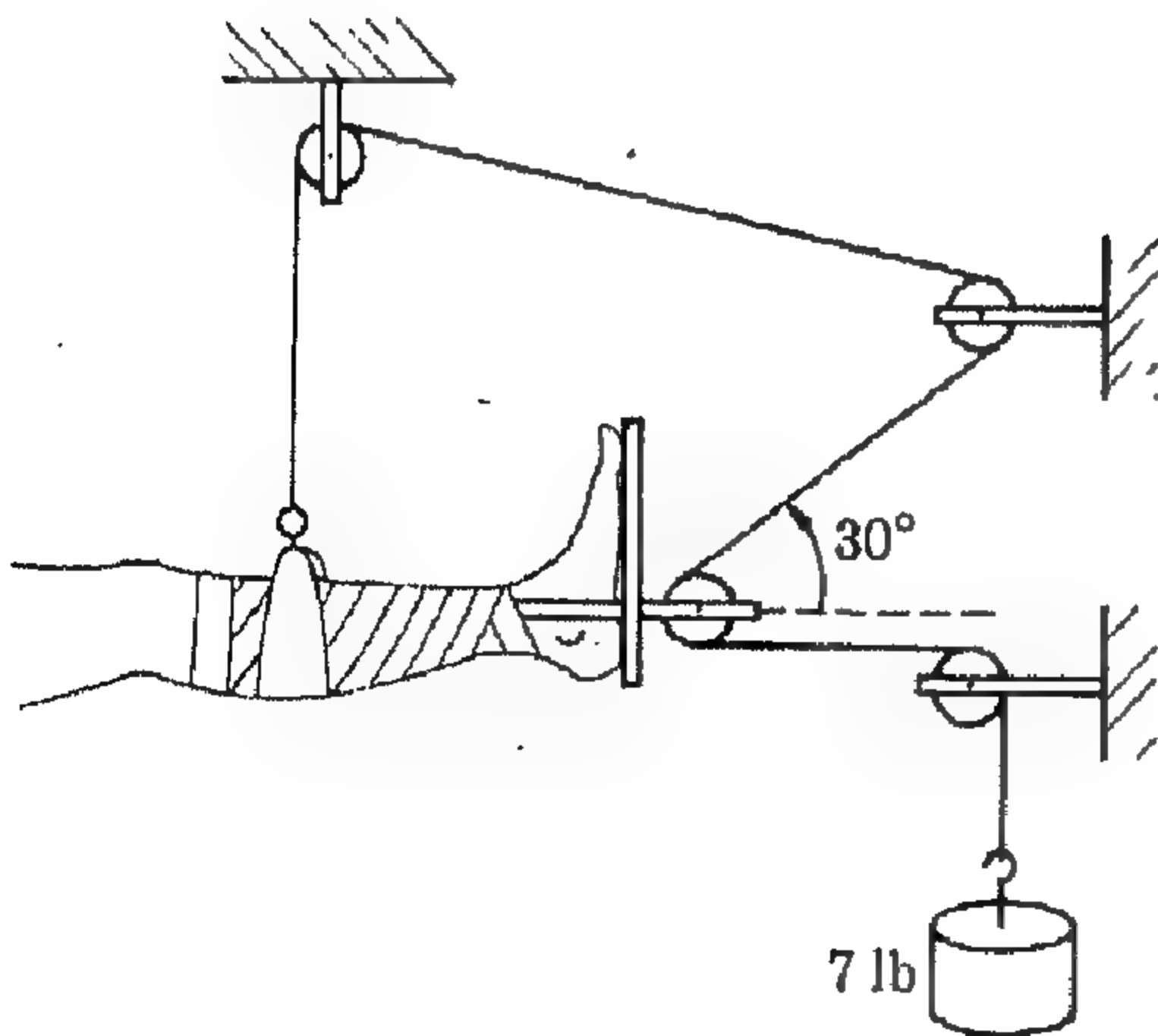
١٦ - يتسلق طالبان وزن كل منهما 200 N حبلا واحدا في صالة التريه الرياضية . وعندما توقف الطالبان عن الحركة تماما كان بعد الطالب العلوي عن السقف 12 ft بينما كان بعد الآخر عن السقف 18 ft . ما هو الشد في الجزء العلوي من الحبل ؟ وما هو الشد في ذلك الجزء الموجود بين المتسلقين ؟ افترض أن الحبل ذو وزن مهمل .



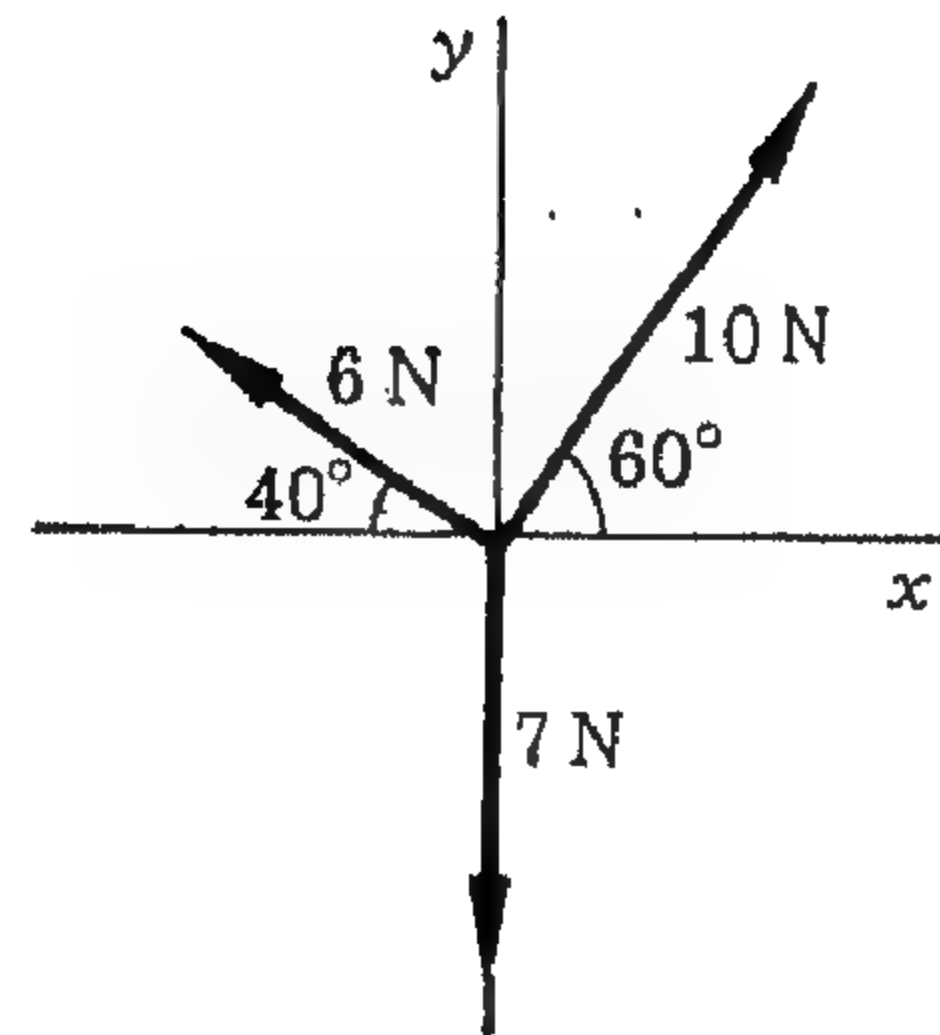
شكل (م ١ - ٣)



شكل (م ١ - ٢)

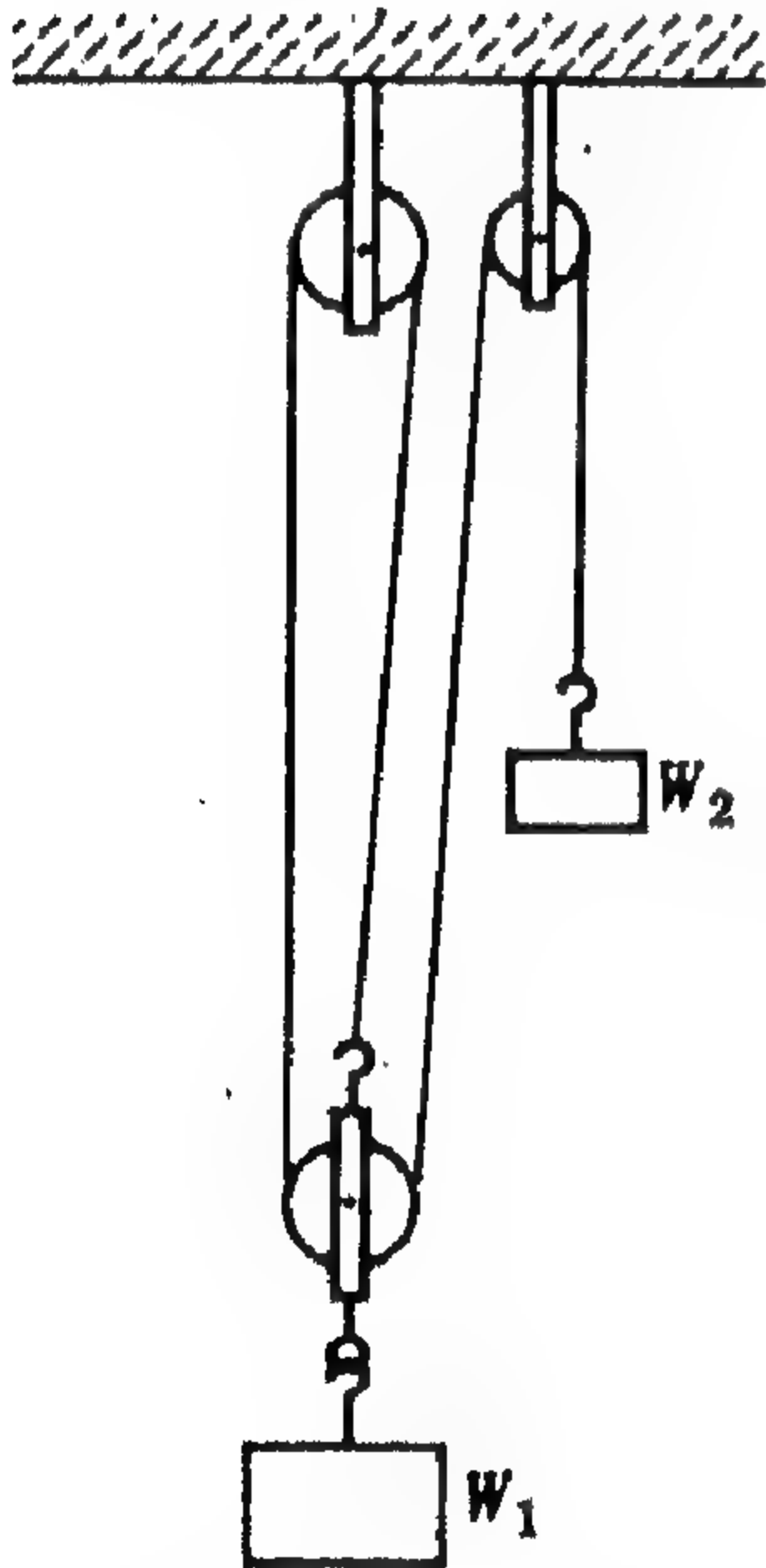


شكل (م ١ - ٥)

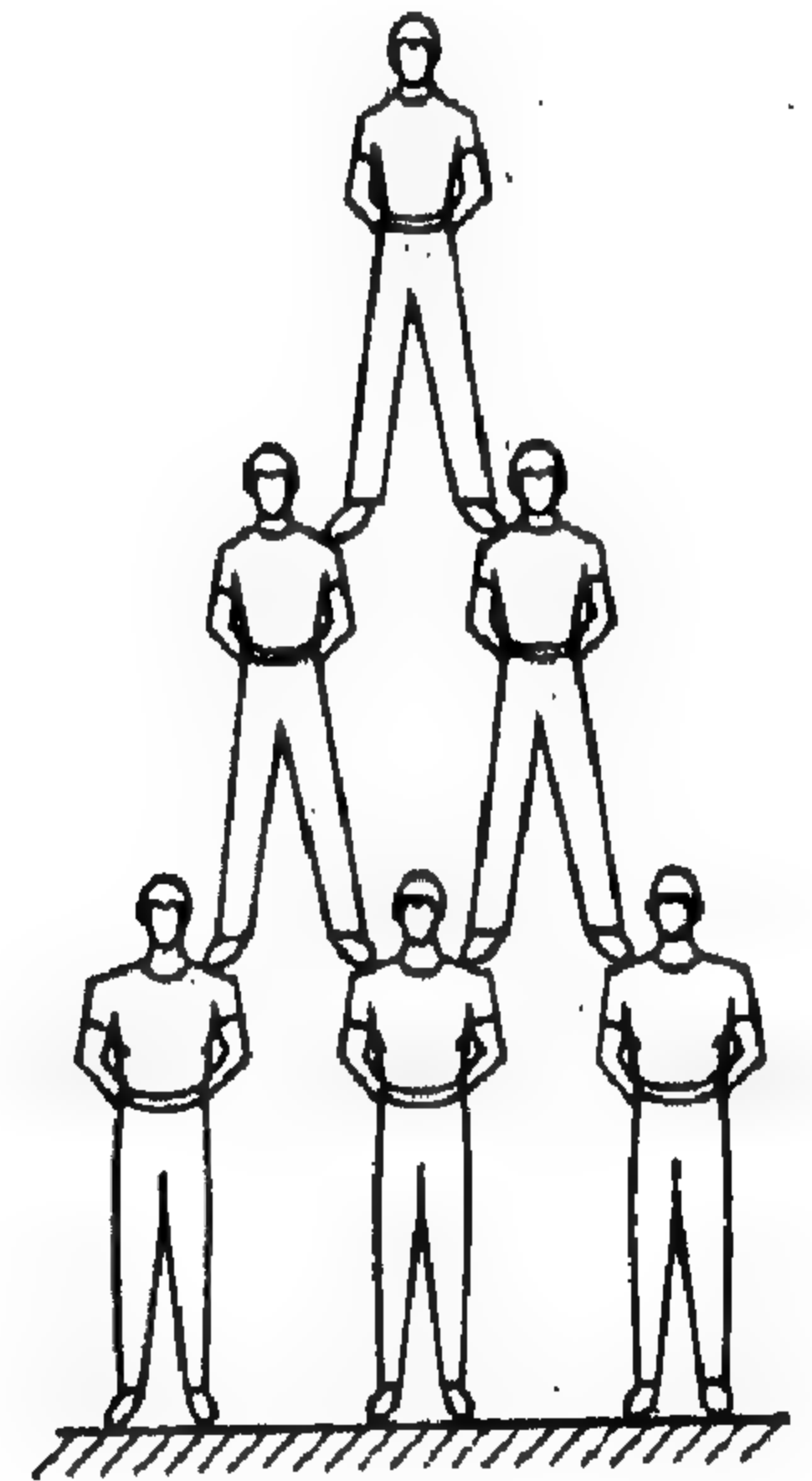


شكل (م ١ - ٤)

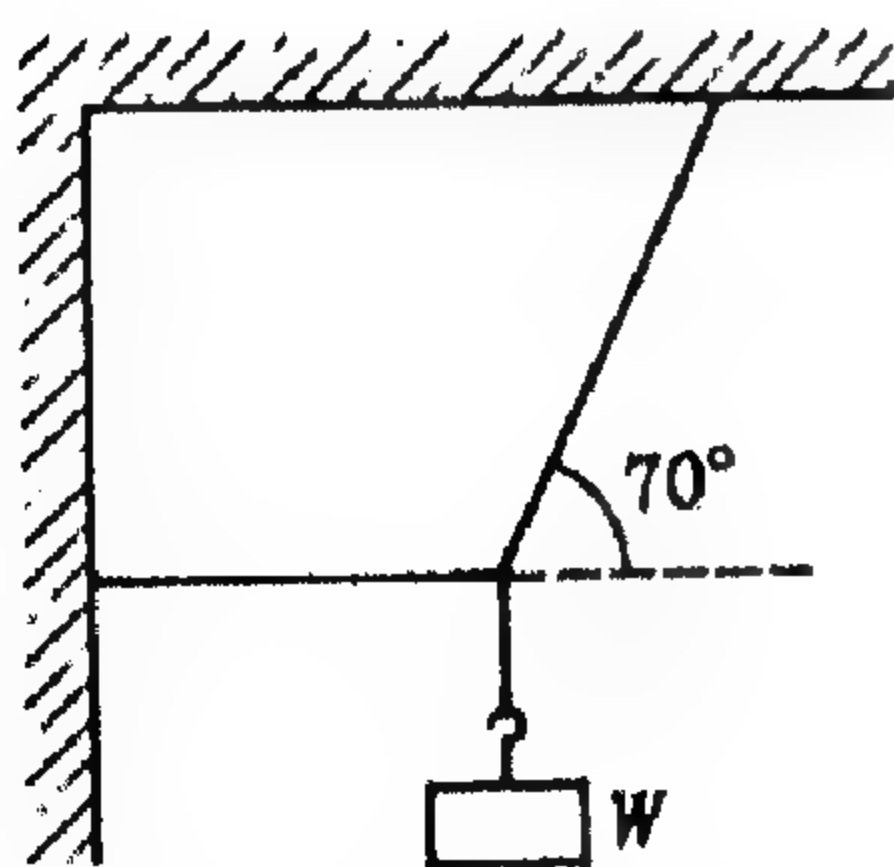
- ١٧ - قذف حبل مهمل الوزن على فرع شجرة بحيث تدلى طرفاه قرب الأرض . وتسلفت فتاتان وزن كل منهما 50 lb فرعى الحبل مسافة ما الى أعلى بحيث تعلقتا فيهما . ماهو الشد في كل من فرعى الحبل ؟ وماهى القوة التى يجذب بها الحبل فرع الشجرة الى أسفل ؟
- ١٨ - يقف ستة من اللاعبين كما موضح فى شكل م ١ - ٦ ، وكان وزن كل من اللاعبين الثلاثة السفليين 900 N بينما كان وزن كل من اللاعبين العلويين الثلاثة 600 N . اوجد محصلة القوة (مقدارا واتجاها) التى يؤثر بها على الأرضية .
- ١٩ - يزن لاعب المشى على الحبل الموضح فى الشكل م ١ - ٧ 150 lb اوجد الشد فى الحبل .
- ٢٠ - يتحمل الحبل المبين فى الشكل م ١ - ٧ شد مقداره 2000 N فقط . ما وزن اللاعب الذى يستطيع هذا الحبل حمله فى الوضع المبين ؟
- ٢١ - تعتبر البكرات فى وضع التوازن الموضح فى الشكل م ١ - ٨ لا احتكاكية وعليه فان الشد متساو فى جميع اجزاء الحبل . افترض أن وزن البكرات والحبال مهمل وأن الحبال رأسية أساسا . ما هو الشد فى الحبل بدلالة وزن الجسم المعلق الأيمن W_2 ؟ ماهى النسبة بين W_1 و W_2 ؟ هذا هو جهاز بسيط لرفع الأحمال الكبيرة .
- ٢٢ - وزن الجسم الموضح فى شكل م ١ - ٩ هو $W=200\text{ N}$ ما هو الشد فى الحبل الأفقى ؟ يمكن اهمال وزن الحبال .
- ٢٣ - اذا علمت أن الشد فى الحبل الاسير فى شكل م ١ - ١٠ هو 60 N ، اوجد W وكذلك الشد فى الحبل الأيمن .
- ٢٤ - اوجد W_2 و W_3 لحالة التوازن الموضحة فى شكل م ١ - ١١ . افترض أن $W_1=100\text{ lb}$ وأن البكرات لا احتكاكية .



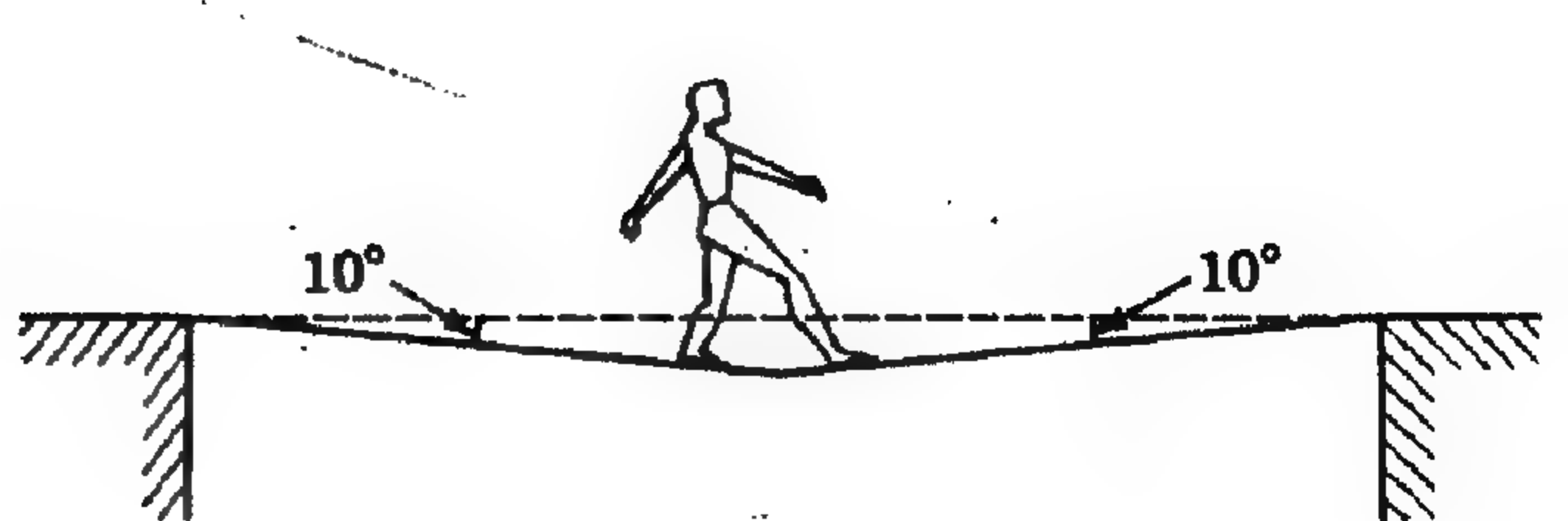
شكل (م ١ - ٨)



شكل (م ١ - ٦)

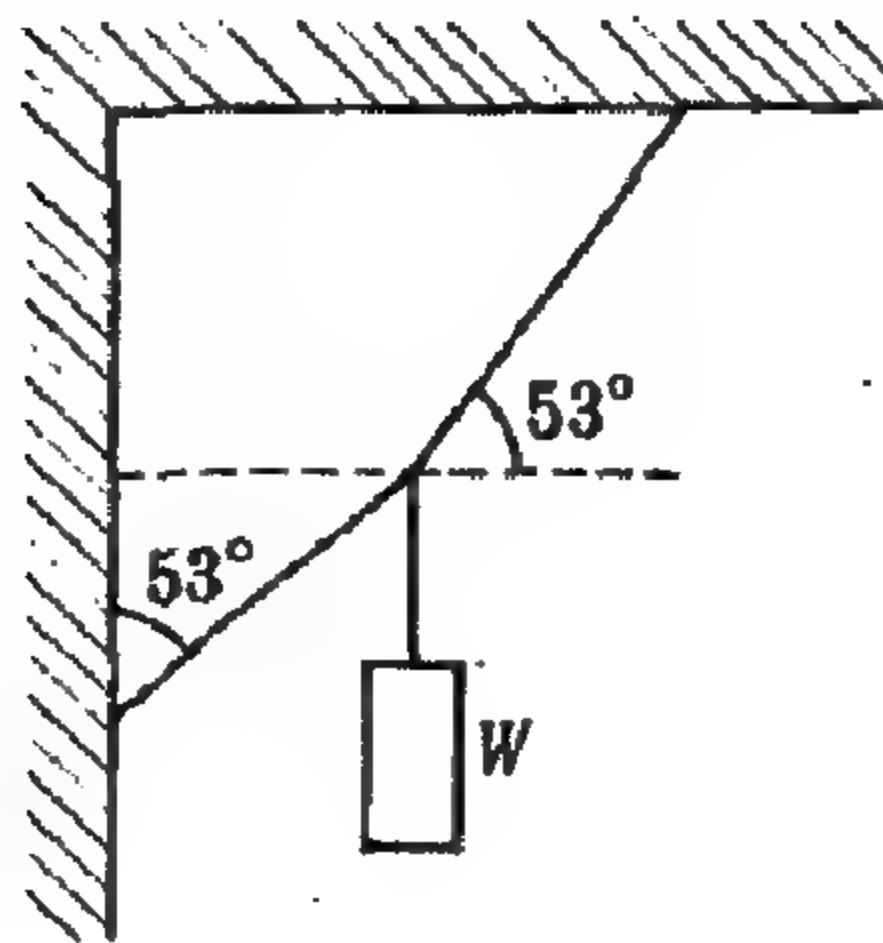


شكل (م ١ - ٩)

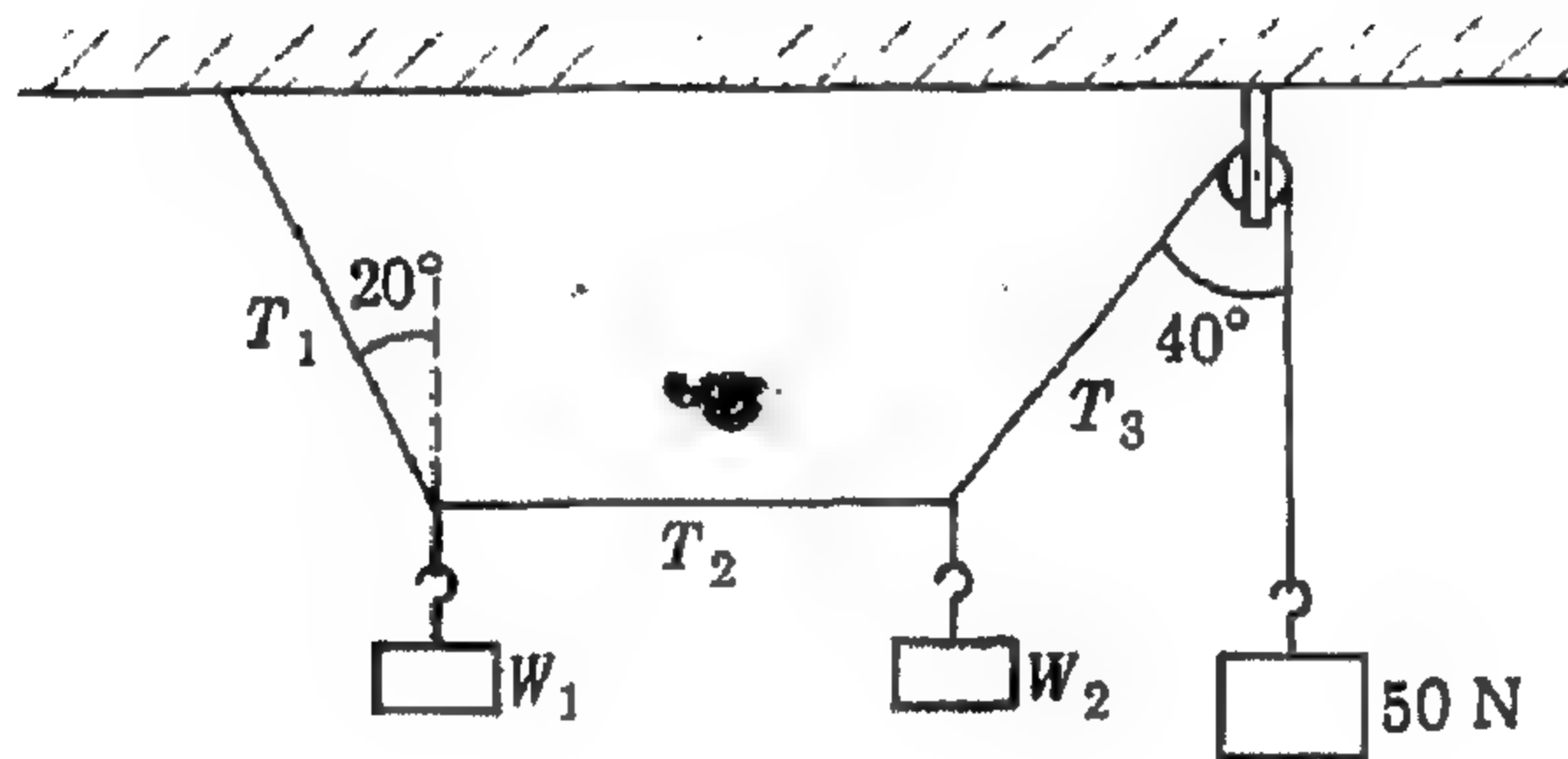


شكل (م ١ - ٧)

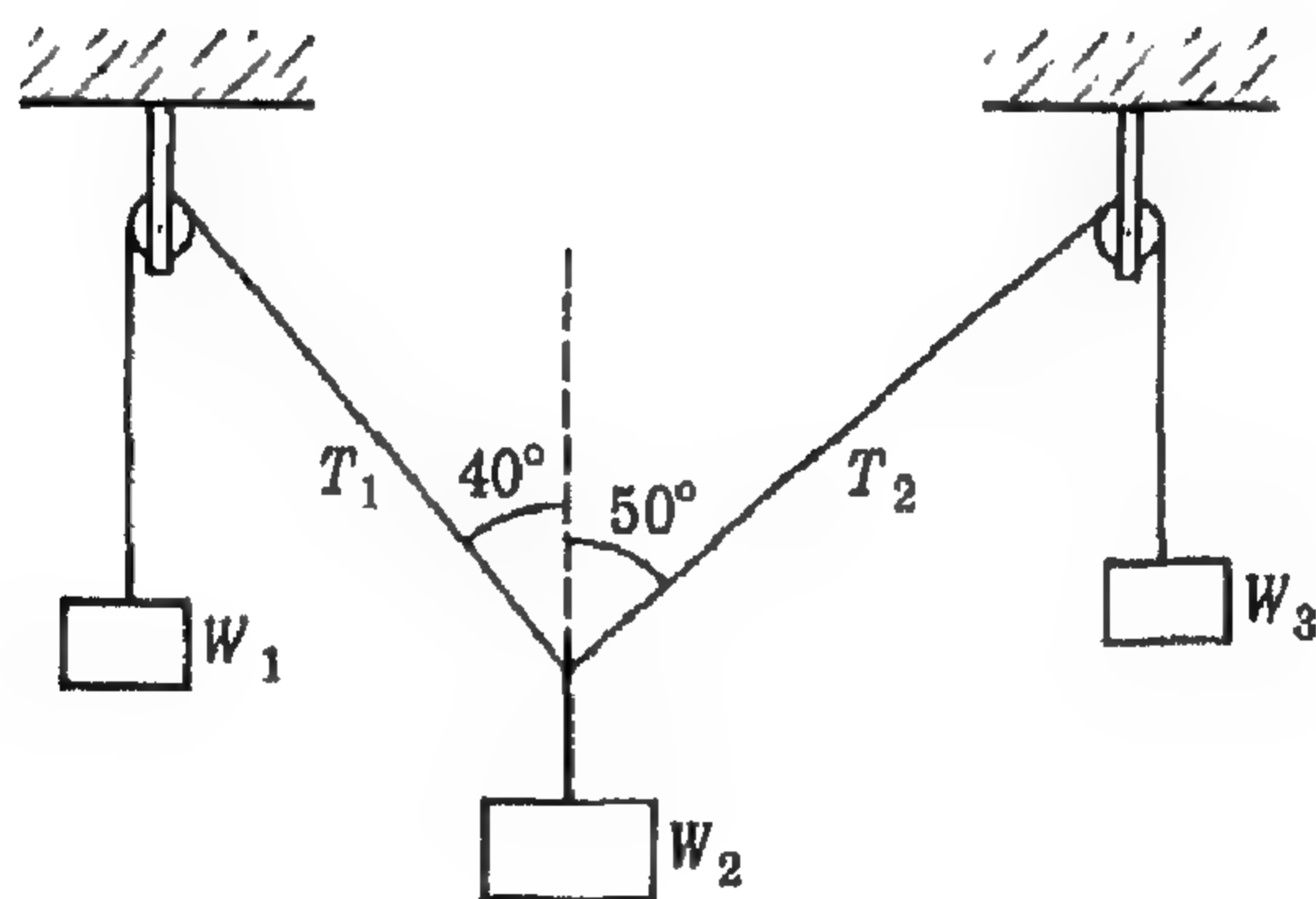
٢٥* - إيجاد T_2 ، T_1 ، W_2 ، W_1 لحالة التوازن الموضحة في شكل م ١ - ١٢ بفرض أن البكرات لا احتكاكية .



شكل (م ١ - ١٠)



شكل (م ١ - ١١)



شكل (م ١ - ١٢)

* هذه المسائل أكثر تعقيدا وتحتاج الى براعة أكثر من المتوسط .

الفصل الثالى

الحركة بعجلة منتظمة

تعلمنا فى الفصل السابق كيف نتعامل مع الأجسام الساكنة . ومن المناسب الآن دراسة الأجسام المتحركة . وتهتم هذه الدراسة بمناقشة طرق وصف حركة الأجسام بدلالة سرعتها وعجلتها أو تسارعها ، وسنجد أن هذه الطرق تمكننا من التنبؤ بحركة الأجسام أثناء السقوط الذاتى . أما دور القوى فى إحداث الحركة فانه سوف يناقش فى الفصل التالى .

٢ - ١ السرعة ومعدل الحركة

كلنا يفهم ماذا تعنى هذه العبارة « تسير السيارة بمعدل حركة قدره 50 mi/h ». وهذا يعنى أن السيارة سوف تقطع مسافة 50 mi في 1 h إذا استمرت في السير بهذا المعدل . ومع ذلك فمن غير المحتمل أن يحتفظ السائق بنفس هذا المعدل لما مدة ساعة كاملة ، فإذا قطع السائق بالفعل مسافة 50 mi في 1 h فيمكن القول بأن متوسط معدل الحركة أثناء هذه الرحلة هو 50 mi/h . ولكن لا يمكننا التعرف من البيانات المعطاه ما إذا كان السائق قد كسر حد معدل الحركة 50 mi/h لكي يوفر بعض الوقت لتناول فنجان من القهوة أثناء الطريق . وقبل أن نتورط في مزيد من التعقيد من الضروري أن نعرف بدقة ماذا يعنى بمتوسط معدل الحركة .

تعريف معدل الحركة هو المسافة المقطوعة في وحدة الزمن . ووحدات هذه الكمية هي ميل في الساعة ، قدم في الثانية ، متر في الثانية ، وهكذا . فإذا كنا نسافر بمعدل حركة قدره 10 mi في 2 s فإن متوسط معدل حركتنا هو 5 mi/s . وقد حصلنا على هذه النتيجة وربما لا شعوريا ، باستخدام المعادلة

$$\text{متوسط معدل الحركة} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن اللازم}}$$

أو ، باستخدام الرموز :

$$\bar{u} = \frac{d}{t} \quad (٢ - ١)$$

حيث يشير القضييب فوق الحرف u الى أن هذه هي القيمة المتوسطة .

لنوضح الآن كيف يمكن الحصول على وحدات معدل الحركة . لنحسب معدل حركة امرأة تقطع مسافة 10 m في 2 s :

$$\bar{u} = \frac{10 \text{ m}}{2 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}$$

وتقرأ هذه الكمية هكذا « خمسة أمتار في الثانية » . بالمثل ، إذا قطع قوقع مسافة 2 cm في 0.4 day فإن معدل حركته هو :

$$\bar{u} = \frac{2 \text{ cm}}{0.4 \text{ day}} = 5 \text{ cm/day}$$

أى إن وحدات معدل الحركة هي دائما وحدة طول مقسومة على وحدة زمن . وعندما تتحرك سيارة في طريق مستقيم فإن حركتها تكون في اتجاه محدد . وإذا

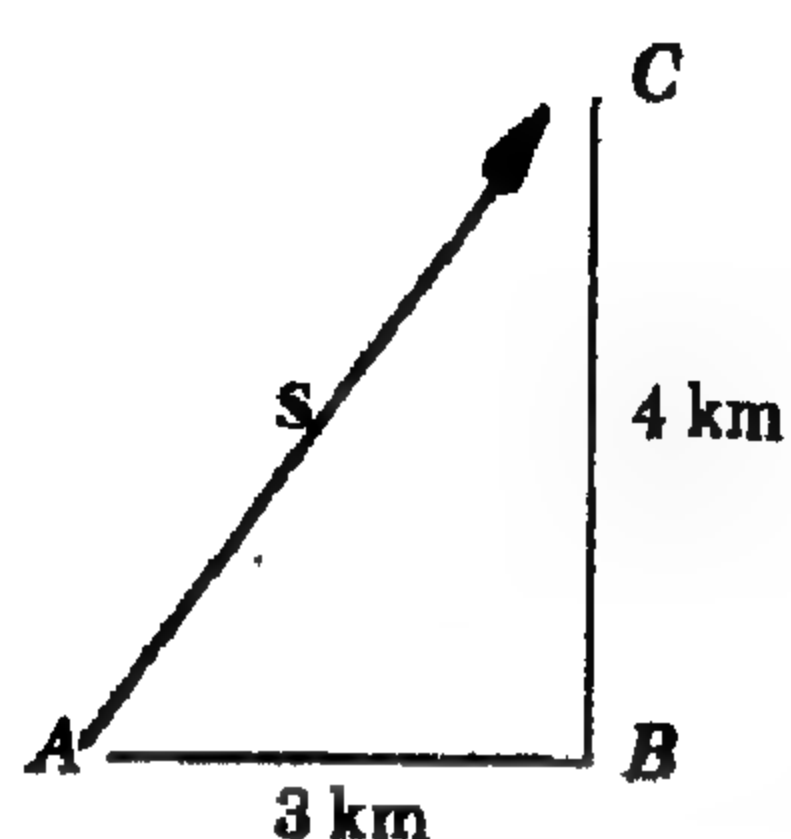
تعريف أردنا ربط هذين المفهومين - معدل الحركة والاتجاه - فإننا نتكلم عن متجه . من المعتاد تعريف متوسط 'متجه السرعة' \bar{v} كإلى :

$$\bar{v} = \frac{\text{displacement vector}}{\text{time taken}}$$

لنفرض مثلاً أن سيارة تبدأ من النقطة A لتصل بعد زمن قدره t إلى النقطة B فإذا كانت الإزاحة الموجهة من A إلى B هي s فإن تعريف متوسط السرعة يكون على هذه الصورة :

$$\bar{v} = \frac{s}{t} \quad (2-2)$$

وإذا كانت الحركة في خط مستقيم في اتجاه ثابت فإن طول المتجه s سيكون ببساطة هو المسافة المقطوعة d . كنتيجة لذلك يمكننا القول أن مقدار السرعة في هذه الحالة المعينة يساوي معدل الحركة لأن $\bar{u} = d/t = s/t = \bar{v}$. أما إذا لم تكن الحركة في خط مستقيم فإن المسافة الكلية المقطوعة d قد تختلف في المقدار عن الإزاحة s .



$$d = 3 + 4 \text{ km} = 7 \text{ km}$$

$$s = \sqrt{3^2 + 4^2} \text{ km} = 5 \text{ km}$$

(a)



$$d = 8 \text{ km}$$

$$s = 4 \text{ km}$$

(ب)

شكل (2-1)

حيث أن مقدار متوسط

معدل الحركة هو $\bar{u} = d/t$

ومقدار متوسط السرعة هو

$\bar{v} = s/t$ فإن هاتين

الكميتين ليستا دائماً

متساويتين .

مثال توضيحي 2-1 : يمثل الشكل 2-1 أ مثلاً بسيطاً ويوضح مسار سيارة من النقطة A إلى B ثم إلى C.

طريقة الحل : نرى من الشكل أن المسافة الكلية المقطوعة d هي 7 km . ومع ذلك فإن مقدار الإزاحة s هو 5 km فقط . يمكننا إذن أن نجد أن :

$$\bar{u} = \frac{d}{t} = \frac{7 \text{ km}}{t} \quad \text{بينما} \quad \bar{v} = \frac{s}{t} = \frac{5 \text{ km}}{t}$$

من الواضح أن مقدارى معدل الحركة والسرعة مختلفان في هذه الحالة . ومع ذلك فإن مقدارى هاتين الكميتين قد يختلفان حتى في حالة الحركة في خط مستقيم ، وهذا موضح في شكل 2-1 ب حيث تسير السيارة من A إلى B ثم خلفاً إلى C . في هذه الحالة :

$$\bar{u} = \frac{8 \text{ km}}{t} \quad \text{بينما} \quad \bar{v} = \frac{4 \text{ km}}{t}$$

ومع ذلك فإننا سوف نوجه حل اهتمامنا في هذا الفصل إلى الحركة ذات الاتجاه الواحد ، وفي هذه الحالة تكون \bar{u} و \bar{v} متساويين .

2-2 السرعة اللحظية ومعدل الحركة اللحظي

لندرس الآن جسمًا يتحرك في خط مستقيم وليكن السيارة المذكورة في الجزء العلوي من شكل 2-2 على سبيل المثال . وسنعتبر أن الاحداثي x هو ذلك الخط الذي تتحرك فيه السيارة كما هو موضح . بناءً على ذلك فإن حركة السيارة تكون إما في الاتجاه الموجب أو الاتجاه السالب من المحور x . (تكون الحركة سالبة إذا كانت

السيارة تتحرك في عكس الاتجاه الموضح . لنفرض أن السيارة تتحرك بمعدل حركة ثابت (وسرعة ثابتة) في الاتجاه الموضح ، ولنفرض أن مقدار معدل الحركة (والسرعة) هو 20 m/s .

من الممكن إثبات أن إزاحة السيارة دالة للزمن على الرسم ، ومن المناسب قياس الإزاحة من النقطة $x=0$. وعليه فإن مقدار متجه الإزاحة s يساوى x . علاوة على ذلك فإذا كانت السيارة في الموضع $x = -10\text{m}$ مثلاً فإن الإشارة السالبة تبين لنا اتجاه الإزاحة ، وهذا يعنى في هذه أن الإزاحة هي 10 m في الاتجاه السالب من المحور x . وعليه فإننا سوف نمثل الإزاحة في خط مستقيم بالمقدار x وهى إزاحة الجسم من النقطة $x=0$.

يمثل الشكل ٢ ٢ برسمًا بيانيًا يبين تغير x مع الزمن للسيارة المعنية ، ويلاحظ من الشكل أن الزمن t هو المتغير المستقل ويقاس على المحور الأفقى للرسم البياني ويمرور الزمن يتغير موضع السيارة ، وباستخدام الخط المستقيم الموضح فى الرسم البياني يمكننا معرفة موضع السيارة عند أية لحظة محددة . فمثلاً عند $t = 0$ كانت السيارة فى نقطة الأصل ، $t = 3 \text{ s}$ نجد أن $x = 60 \text{ m}$ ، أى أن السيارة كانت على مسافة قدرها 60 m من نقطة الأصل . لاحظ أن المثلثات الصغيرة الموضحة فى الرسم البياني تبين لنا أن السيارة تسير مسافة قدرها $\Delta x = 20 \text{ m}$ فى زمن قدره $\Delta t = 1 \text{ s}$. (من المعتاد استخدام Δx وتقرأ « دلتا x » و Δt وتقرأ « دلتا t » لتمثل فترات المسافة والزمن الصغيرة جداً) . من تعريف متوسط معدل الحركة نجد أن :

$$\bar{u} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 20 \text{ m/s}$$

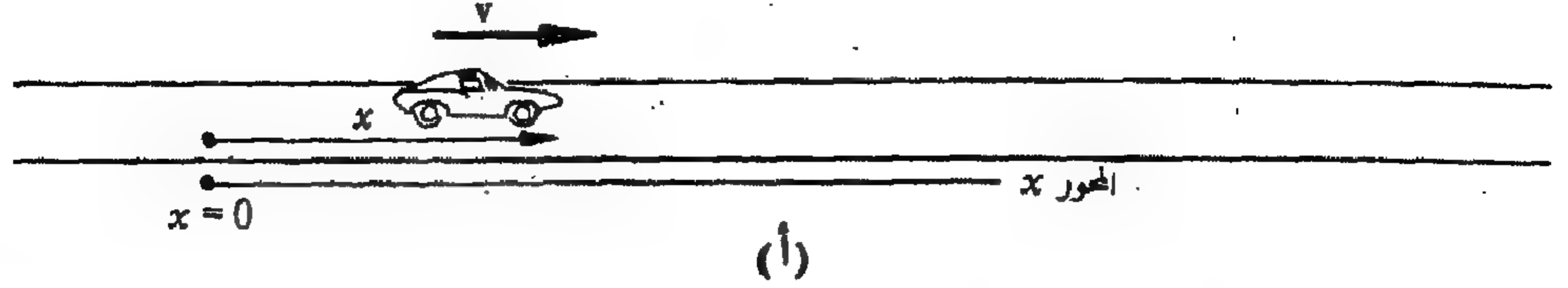
وهو ما كان متوقعا .

يعطى مقدار متوسط السرعة بالعلاقة التالية :

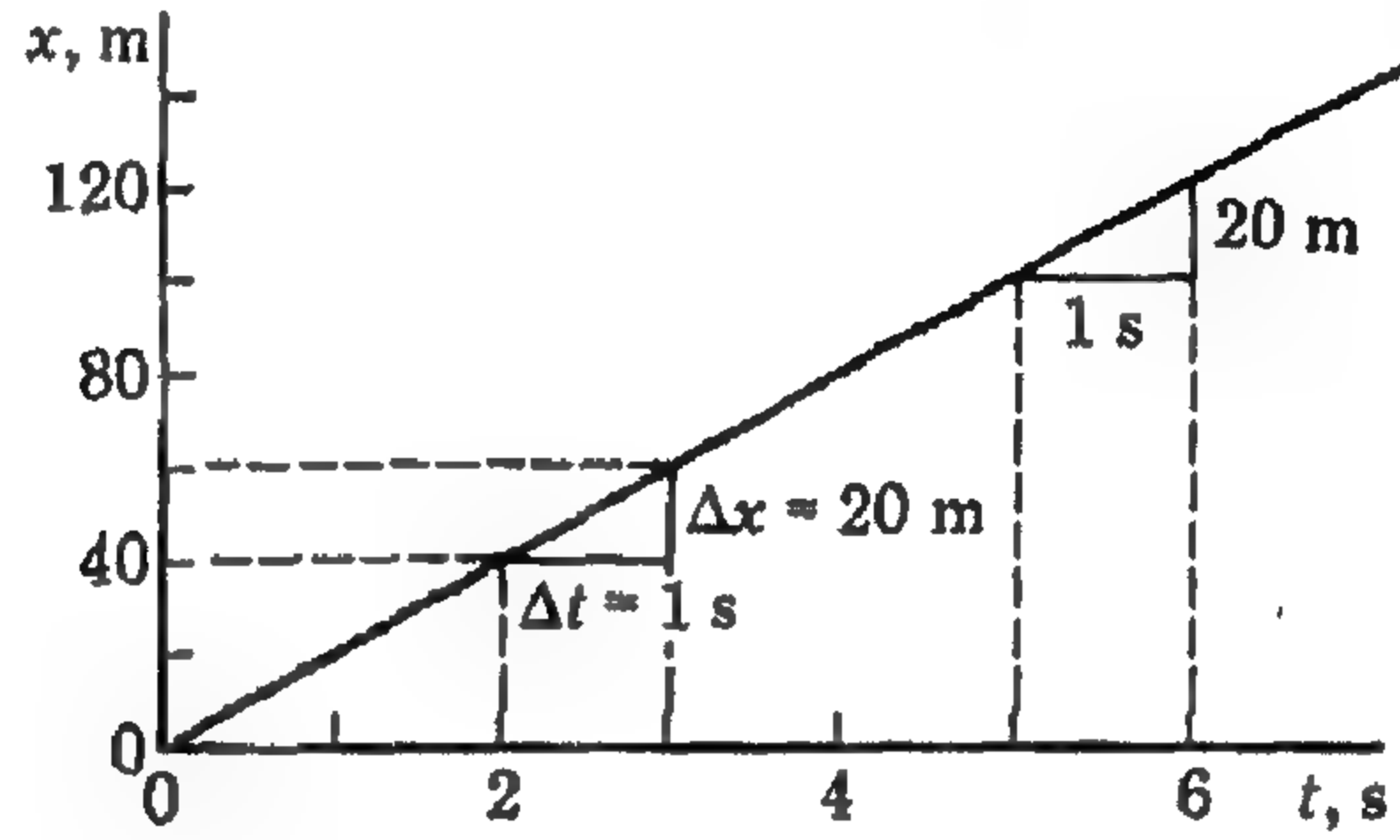
$$\bar{v} = \frac{\text{مقدار متجه الإزاحة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 20 \text{ m/s}$$

من هذا يتبين أن مقدار متوسط السرعة يساوى متوسط معدل الحركة فى هذه الحالة . كذلك فإن الرسم البياني يخبرنا بأن السيارة تتحرك بمعدل حركة ثابت ، اذ أن جميع المثلثات ذات الضلعين Δx و Δt والمشابهة لتلك الموضحة بالشكل تعطينا نفس متوسط معدل الحركة وهو 20 m/s يمكننا اذن استنتاج انه اذ كان الجسم يتحرك فى خط مستقيم بسرعة ومعدل حركة ثابتين فإن الرسم البياني الذى يمثل تغير x مع t لهذا الجسم يكون دائما خطا مستقيما .

وقبل أن نترك المثال الموضح في شكل ٢ - ٢ يجب أن نلاحظ أن $\Delta x / \Delta t$ هو ميل الخط المبين* . وفي هذه الحالة على الأقل يتساوى مقدارا معدل الحركة والسرعة مع ميل الخط البياني الذي يمثل العلاقة بين x و t ، وسنرى حالا أن هذا صحيح دائما .



شكل (٢ - ٢)
يمكن تمثيل الحركة في خط
مستقيم بيانيا . في هذه الحالة
كانت السيارة تتحرك بمعدل
حركة ثابت مقداره 20 m/s



(ب)

مثال توضيحي ٢ - ٢ : تتحرك سيارة في طريق مستقيم بمعدل حركة غير ثابت
صف حركة السيارة بالاستعانة بالشكل ٢ - ٣ .

طريقة الحل : نرى من الرسم البياني أن السيارة تقف ساكنة عند النقطة A و C حيث لا تتغير x بتغير t بالقرب من هاتين النقطتين ، وهذا يعنى بالضرورة أن السيارة لا تتحرك . وبالرغم من ذلك فإن السيارة تتحرك بالقرب من النقطة B نحو القيم الأكبر من x لأن x تزداد مع الزمن . ويلاحظ أن الموقف بالقرب من B يشبه كثيرا ذلك الموضح في شكل ٢ - ٢ . وفي الحقيقة فإن متوسط معدل الحركة بالقرب من B هو :

$$\bar{u} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{50 \text{ m}}{20 \text{ s}} = 2.5 \text{ m/s}$$

ومتوسط سرعة السيارة بالقرب من B هو 2.5 m/s في الاتجاه الموجب من المحور x . (لاحظ أن السرعة متجه) .

أما عند النقطة D فإن الموقف يختلف قليلا ، فبالقرب من هذه النقطة تتحرك السيارة نحو القيم الأصغر من x لأن x تقل مع الزمن ، أى أن السيارة تسير في الاتجاه المعاكس لذلك الموضح في شكل ٢ - ٢ . وحيث أن x تقل في المنطقة القريبة من D

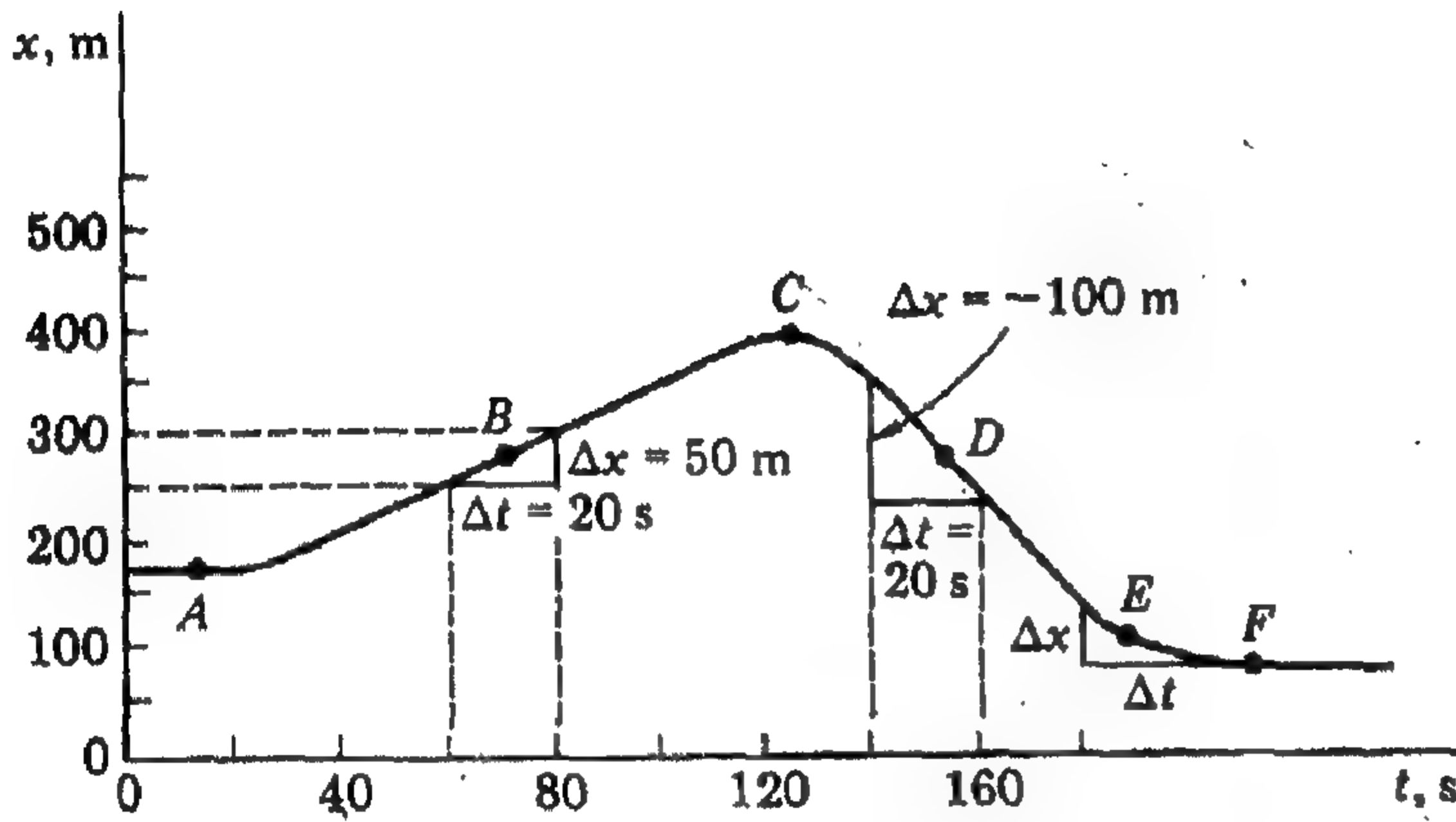
* لايجاد ميل المنحنى عند نقطة معينة عليه أرسم خطا مماسيا للمنحنى عند هذه النقطة . الميل هو ظل الزاوية التي يصنعها هذا الخط . أو ، بالتعبير العامى ، ارتفاع الخط المماسى مقسوما على مده .

فان الكمية Δx سالبة لأنها تمثل نقصا في x . متوسط معدل الحركة بالقرب من D هو :

$$\bar{u} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{|\Delta x|}{\Delta t} = \frac{100 \text{ m}}{20 \text{ s}} = 5.0 \text{ m/s}$$

لاحظ أن معدل الحركة لا يرتبط بالاتجاه . بناء على ذلك فاننا نستخدم فقط مقدار المسافة Δx التي تمثلها هكذا $|\Delta x|$. وعند حساب معدل الحركة تسقط الإشارة السالبة التي تبين الاتجاه .

ولكن عند حساب متوسط السرعة بالقرب من D يجب استخدام الإشارة السالبة ، ويمكن تفسير الإشارة السالبة في هذه الحالة على أنها الرمز الذي يعطى الاتجاه .



شكل (٢ - ٣)
هل يمكنك أن توضح من
الرسم أن الجسم ساكن عند
النقطتين A و C ؟ وهل
يمكنك أن تبين أنه يتحرك في
التجاهين متعاكسين عند
النقطتين B و D ؟

اذن :

$$\text{متوسط السرعة عند } D = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-100 \text{ m}}{20 \text{ s}} = -5.0 \text{ m/s}$$

وتوضح الإشارة السالبة أن السرعة في الاتجاه السالب من x .

أما الموقف عند النقطة E فانه يختلف عما سبق معالجته اذ أن السيارة تبطيء من حركتها في هذا المكان استعداد للوقوف عند F . فاذا حسبنا الآن متوسط معدل حركة السيارة بالقرب من E من المثلث الموضح فان النتيجة قد تختلف عن القيمة المضبوطة لمعدل حركة السيارة عند E ، اذ أن القيمة المحسوبة هي فقط القيمة المتوسطة لمعدلات الحركة في خلال الفترة التي يمثلها المثلث . ومع ذلك فاذا أخذنا فترة زمنية صغيرة جدا Δt بحيث تكون E مركزها فان النتيجة ستكون قريبة جدا من معدل حركة السيارة عند E .

وفي الحقيقة فإن معدل حركة السيارة عند عبورها للنقطة E في شكل ٢ - ٣ هو معدل حركتها للحظة واحدة فقط . ذلك لأن السيارة كانت تتحرك أسرع قبل أن تصل إلى E منها عند E ، أما بعد ذلك فإنها كانت تتحرك أبطأ منها عند E . يمكننا إذن أن نعرف معدل حركة الجسم عند لحظة معينة بأنه معدل الحركة اللحظي لهذا الجسم . لايجاد معدل الحركة اللحظي للسيارة عند النقطة E يجب قياس الزمن Δt اللازم لكي تقطع السيارة مسافة صغيرة جدا Δx مركزها هو النقطة E . ويمكن صياغة هذه العبارة رياضيا على الصورة الآتية :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \equiv u = \text{معدل الحركة اللحظي}$$

حيث تعني الدلالة $\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$ أننا نوجد قيمة $\Delta x / \Delta t$ عندما تكون قيمة Δt صغيرة صغرا كافيا ومقاربة للصفر . ومن الواضح أنه من غير المحتمل أن تغير السيارة معدل حركتها أثناء هذه الفترة الزمنية الضئيلة . وعليه فإن معدل الحركة التي نقيسه سيكون قريبا جدا من معدل الحركة عند E ، وهذا هو معدل الحركة اللحظي عند النقطة E .

وحيث أن الجسم لا يستطيع تغيير اتجاهه في خلال هذه الفترة الزمنية القصيرة جدا فإن إزاحة الجسم s المقاسة خلال هذه الفترة الزمنية ستكون مقاربة جدا للمسافة التي يتحركها الجسم خلال هذه الفترة . بناء على ذلك فإن مقدار السرعة المقاس لهذه الفترة الزمنية الضئيلة سيكون قريبا جدا من معدل الحركة اللحظي وعليه فمن الممكن تعريف السرعة اللحظية للجسم كمايلي . لنفرض أن الجسم يجتاز إزاحة موجهة Δs في فترة زمنية قصيرة جدا Δt . وعليه فإن السرعة اللحظية للجسم تعرف كمايلي :

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (٢ - ٣)$$

حيث تعني الدلالة $\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$ أننا نأخذ القيمة الحدية للكمية $\Delta s / \Delta t$ عندما تقترب قيمة Δt من الصفر . وكما أثبتنا فيما سبق ، مقدار السرعة اللحظية v يساوي معدل الحركة اللحظي u .

في مثالنا المحدد ، $\Delta s = \Delta x$ وعليه $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta x / \Delta t$ وكما نرى فإن السرعة اللحظية تعطى بالنسبة بين Δx و Δt في مثلث صغير مثل ذلك المثلث الموضح في شكل ٢ - ٣ . ولكن إذا كان المثلث صغيرا صغرا كافيا فإن قيمة $\Delta x / \Delta t$ ستكون ميل المنحنى البياني حتى قرب نقطة مثل E . نستنتج من ذلك أن السرعة اللحظية في اتجاه المحور x تساوي ميل المنحنى الذي يمثل تغير x مع t في اللحظة المعينة . وبالإضافة إلى ذلك فإن إشارة الميل (+ أو -) تبين ما إذا كانت السرعة في الاتجاه الموجب أو السالب من المحور x .

٢ - ٣ تحويل الوحدات

في كثير من الأحيان تعطى لنا الكميات مقاسة بوحدات معينة ويكون من الضروري تحويلها الى وحدات أخرى . فمثلا قد نعلم معدل الحركة بالميل في الساعة ويراد إيجاد القيمة المكافئة بالمتري في الثانية . أو ، كمثال آخر ، تعبر صكوك ملكية العقارات القديمة عن أبعاد الملكية بالقصبة ، بناء على ذلك يلزمنا أن نعرف كيف يحول الطول بالقصبات الى أقدام أو أمتار . لاجراء مثل هذا النوع من تحويل الوحدات يجب استعمال معاملات التحويل . من المعلوم ، مثلا ، أن :

$$1 \text{ rod} = 16.50 \text{ ft}$$

لاستخدام هذه الحقيقة اقسم طرفي المعادلة على 1 rod لتحصل على :

$$1 = \frac{16.50 \text{ ft}}{1 \text{ rod}}$$

تسمى هذه الكمية معامل التحويل بين القصبات والأقدام .

لاحظ أن معامل التحويل يساوي الوحدة ، لذلك اذا ضرب أى عدد في هذه الكمية أو قسم عليها فانه لن يتغير وسنرى فائدة هذه العملية في المثال التوضيحي التالي .

مثال توضيحي ٢ - ٣ : حول 30 rod الى الطول المكافئ بالأقدام .
طريقة الحل : نعلم أن :

$$30 \text{ rods} = (30 \text{ rods}) \left(\frac{16.50 \text{ ft}}{\text{rod}} \right)$$

وهذا صحيح لأن معامل الضرب 16.50 ft/rod يساوي الوحدة . ولكن وحدة القصبات يمكن شطبها لنحصل على :

$$30 \text{ rods} = (30 \text{ rods}) \left(\frac{16.50 \text{ ft}}{\text{rod}} \right) = 495 \text{ ft}$$

أى اننا قد نجحنا في اثبات ان 30 rod تساوي 495 ft وذلك باستخدام معامل التحويل .

يحتوى بطن الغلاف الأمامى لهذا الكتاب على مجموعة من معاملات التحويل المفيدة . لنأخذ الآن بعض الاستخدامات النموذجية لها .

مثال توضيحي ٢ - ٤

١ - حول 36 in (inches) الى سنتيمترات .

معامل التحويل :

$$2.54 \text{ cm/in}$$

الطريقة :

$$36 \text{ in} = (36 \text{ in}) \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{\text{in}} \right) = 91.44 \text{ cm}$$

٢ - حول 270 cm الى بوصات .

الطريقة :

$$270 \text{ cm} = (270 \text{ cm}) \left(\frac{1}{2.54 \text{ cm/in}} \right)$$

لاحظ أننا قسمنا على معامل التحويل في هذه الحالة بحيث تشطب الوحدة cm بقلب المقام والضرب نحصل على :

$$270 \text{ cm} = (270 \text{ cm}) \left(\frac{\text{in}}{2.54 \text{ cm}} \right) = 106.3 \text{ in}$$

٣ - حول 60 acres الى هكتارات .

معاملات التحويل :

$$10,000 \text{ m}^2/\text{hectare} \quad 0.305 \text{ m/ft} \quad 43,560 \text{ ft}^2/\text{acre}$$

الطريقة :

$$\begin{aligned} 60 \text{ acres} &= (60 \text{ acres}) \left(\frac{43,560 \text{ ft}^2}{\text{acre}} \right) = 2,613,600 \text{ ft}^2 \\ &= (2,613,600 \text{ ft}^2) \left(\frac{0.305 \text{ m}}{\text{ft}} \right) \left(\frac{0.305 \text{ m}}{\text{ft}} \right) \\ &= 243,100 \text{ m}^2 \\ &= (243,100 \text{ m}^2) \left(\frac{1 \text{ hectare}}{10,000 \text{ m}^2} \right) = 24.3 \text{ hectares} \end{aligned}$$

سنقابل كثيرا من الاستخدامات الأخرى لمعاملات التحويل عندما نتقدم في دراستنا .

٢ - التسارع (العجلة)

يقال ان الجسم متسارع اذا كانت سرعته متغيرة . يعرف التسارع أو العجلة بأنه التغير في السرعة (وليس معدل الحركة) في وحدة الزمن . ويمكن صياغة هذا التعريف كمعادلة على الصورة :

$$\text{التسارع (العجلة)} = \frac{\text{التغير في السرعة}}{\text{الزمن اللازم}}$$

أو :

$$\bar{a} = \frac{v_f - v_0}{t} \quad (٢ - ٤)$$

حيث v_0 السرعة الابتدائية ، v_f السرعة النهائية بعد مرور زمن قدره t . وحيث أن \bar{a} عبارة عن مجموع متجهين مقسوما على كمية قياسية t :

$$\bar{a} = \frac{v_f + (-v_0)}{t}$$

فإن \bar{a} لابد أن تكون متجهها أيضاً. سنناقش في هذا الفصل الحركة في خط مستقيم فقط ، وعليه فإن مقدار \bar{a} ويكتب هكذا \bar{a} هو الذى سوف يهملنا دائماً . ومع ذلك سوف تضاف الإشارة الموجبة أو السالبة لتوضيح ماذا كانت العجلة في الاتجاه الموجب أو السالب من الخط .

مثال توضيحي ٢ - ٥ : لنفرض أن سيارة تبدأ من السكون ثم تتسارع (تزيد من سرعتها) الى سرعة قدرها 20 ft/s في مسار خطى مستقيم في زمن قدره 4 s كما هو موضح بالخط الأسود في شكل ٢ - ٤ . أوجد متوسط التسارع .

طريقة الحل : من الشكل نجد أن $v_0 = 0$ ، $v_f = 20 \text{ ft/s}$ عند $t = 4 \text{ s}$ بالتعويض في المعادلة (٢ - ٤) (مع حذف علامة المتجه حيث أن الحركة بأكملها في نفس الاتجاه) :

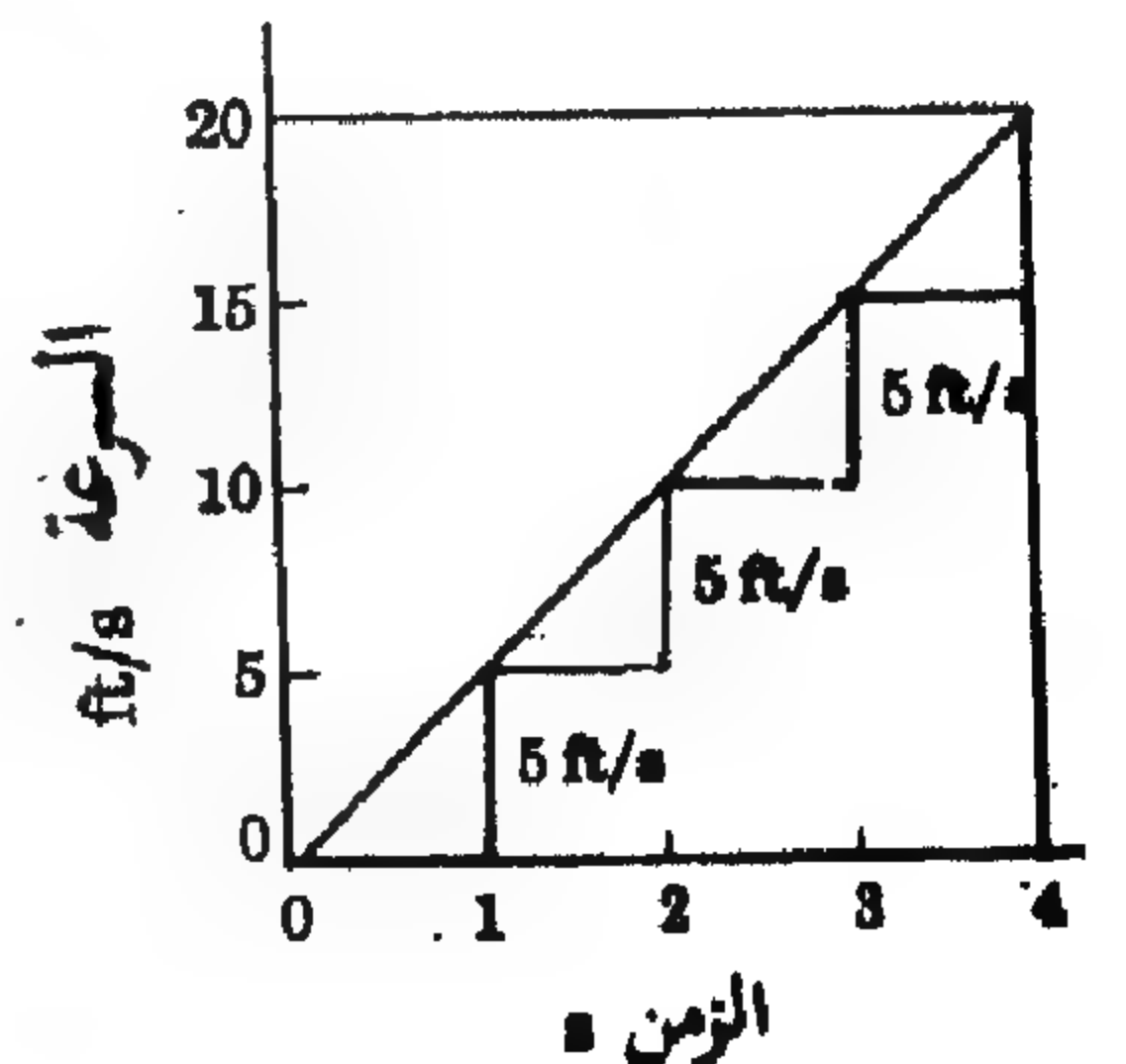
$$\bar{a} = \frac{20 \text{ ft/s} - 0}{4 \text{ s}} = \frac{20 \text{ ft/s}}{4 \text{ s}} = \frac{5 \text{ ft/s}}{\text{s}}$$

وتقرأ هكذا « خمسة أقدام في الثانية لكل الثانية » أو « خمسة أقدام في الثانية في الثانية » . وبأسلوب آخر ، تزداد سرعة السيارة بمعدل قدره 5 ft/s لكل ثانية ، وهذا المعدل في زيادة السرعة هو الكمية الى سمينها سابقا بالتسارع . وتكتب النتيجة السابقة للكمية \bar{a} عادة على الصورة 5 ft/s^2 وتقرأ « خمسة أقدام في الثانية المربعة » .

تعريف

شكل (٢ - ٤)

يوضح الخط الأسود تغير السرعة مع الزمن لسيارة تتحرك بتسارع منتظم مقداره 5 ft/s لكل ثانية



وعموماً فإن وحدات \bar{a} هي وحدة مسافة مقسومة على حاصل ضرب وحدتي زمن . ويمكن أن تكون هذه الوحدات ميلاً في الثانية المربعة ، قدماً في الثانية في الساعة ، سنتيمتراً في الثانية في الدقيقة ، ميلاً في الساعة في الثانية وهلم جرا* . وعلى أى حال فإن المعنى الفيزيائي للتسارع يجب أن يكون واضحاً . فالتسارع هو التغير في السرعة في وحدة الزمن كما هو مبين في شكل ٢ - ٤ .

٢ - ٥ الحركة منتظمة التسارع - الحركة بعجلة منتظمة

لنرجع مرة ثانية إلى شكل ٢ - ٤ . لاحظ أن السرعة الممثلة في الرسم البياني تزداد بمعدل 5 ft/s لكل ثانية أثناء الزمن الذي يغطيه الرسم . ويعنى هذا أن معدل زيادة السرعة ، أى التسارع ، منتظم ويساوى 5 ft/s^2 . وبالرغم من أن التسارع المنتظم أو الثابت يتحقق في بعض الحالات الخاصة فقط ، فإننا سنرى أن هذه الحالات في غاية الأهمية . وحيث أن الحركة المرتبطة بالتسارع غير المنتظم من الصعب عادة معالجتها فإننا سنقصر مناقشتنا في هذا الفصل على حالة الحركة ذات التسارع الثابت . في هذه الحالات يكون متوسط التسارع والتسارع اللحظي متساويين لأن التسارع ثابت . بناء على ذلك لن نفرق بين هاتين الكميتين فيما تبقى من هذا الفصل .

عندما يكون التسارع ثابتاً فإن معدل حركة الجسم المتحرك وسرعته تتغير بانتظام مع الزمن . لذلك فإن متوسط السرعة ماهو إلا نصف مجموع السرعتين تعريف الإبتدائية والنهائية ، إذن :

$$\bar{v} = \frac{v_f + v_0}{2} \quad (٢ - ٥)$$

حيث v_f السرعة النهائية و v_0 السرعة الابتدائية . وفي تلك الحالة الخاصة التي يكون فيها التسارع ثابتاً ومساوياً للصفر فإن السرعة لا تتغير ، وعليه $v_f = v_0$. في هذه الحالة تعطينا المعادلة (٢ - ٥) هذه القيمة $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v_0) = v_0$ كما هو متوقع .

لدينا الآن ثلاث معادلات تنطبق على الحركة منتظمة التسارع وهي المعادلات (٢ - ٢) ، (٢ - ٤) ، (٢ - ٥) وهي كافية لحل المسائل العادية المتعلقة بالحركة منتظمة التسارع . لنفحص الآن حالة نموذجية .

مثال توضيحي ٢ - ٦ : افترض أن سيارة تبدأ من السكون وتتسارع بانتظام إلى معدل حركة قدره 5.0 m/s في 10 s . اوجد تسارع هذه السيارة والمسافة المقطوعة في هذا الزمن .

طريقة الحل : لكي نبدأ حل هذه المسألة لنكتب أولاً ماهو معلوم وماهو غير معلوم .

* عند حل المسائل يراعى عدم خلط وحدتي زمن في نفس المسألة .

$$v_0 = 0 \quad v_f = 5.0 \text{ m/s} \quad t = 10 \text{ s}$$

$$a = ? \quad s = ?$$

من المعادلة (٢ - ٤) نجد مباشرة أن :

$$a = \frac{v_f - v_0}{t} = \frac{5.0 - 0 \text{ m/s}}{10 \text{ s}} = 0.50 \text{ m/s}^2$$

ومن المعادلة (٢ - ٥) نحصل على :

$$\bar{v} = \frac{5.0 + 0}{2} = 2.5 \text{ m/s}$$

وأخير باستخدام المعادلة (٢ - ٢) :

$$s = \bar{v}t = (2.5 \text{ m/s})(10 \text{ s}) = 25 \text{ m}$$

مثال توضيحي ٢ - ٧ : كمثال آخر افترض أن السيارة تسير بسرعة قدرها 5.0 m/s لكي تصل الى السكون بعد مسافة قدرها 20 m . اوجد التقاصر والزمن اللازم للوقوف .

طريقة الحل : باتباع نفس الطريقة السابقة ، لنكتب المعطيات والمجهول .

$$v_0 = 5.0 \text{ m/s} \quad v_f = 0 \quad s = 20 \text{ m}$$

$$a = ? \quad t = ?$$

يمكننا أولاً إيجاد متوسط السرعة :

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v_f) = 2.5 \text{ m/s}$$

بمعلومية متوسط السرعة ومعرفة أن المسافة تعطى بالعلاقة :

$$s = \bar{v}t \quad \text{أو} \quad t = \frac{s}{\bar{v}}$$

نجد أن :

$$t = \frac{20 \text{ m}}{2.5 \text{ m/s}} = 8 \text{ s}$$

يمكننا اذن إيجاد التسارع من المعادلة (٢ - ٤) :

$$a = \frac{0 - 5.0 \text{ m/s}}{8 \text{ s}} = -0.625 \text{ m/s}^2$$

وتبين اشارة الجواب السالبة أن سرعة السيارة تتناقص ولا تزيد . أى أن التسارع في الاتجاه السالب من خط الحركة .

يبين هذان المثالان التوضيحيان بجلاء أنه من المفيد اتباع طريقة منهجية منظمة لحل هذه المسائل . أولاً تكتب المعطيات والمجهول ثم تستخدم المعادلة المناسبة من المعادلات (٢ - ٢) أو (٢ - ٤) أو (٢ - ٥) لإيجاد المجهول . ولكن هناك حالات

أخرى أكثر صعوبة من المثالين التوضيحيين السابقين . لنأخذ مثالا لاحدى هذه الحالات .

مثال توضيحي ٢ - ٨ : تبدأ سيارة من السكون وتتسارع بمعدل 4.0 m/s^2 خلال مسافة قدرها 20 m . بأى سرعة تسير السيارة عندئذ ؟ وما هو الزمن الذى أخذته السيارة ؟

طريقة الحل : تكتب المعطيات والمجاهيل :

$$v_0 = 0 \quad a = 4.0 \text{ m/s}^2 \quad s = 20 \text{ m}$$

$$v_f = ? \quad t = ?$$

معادلاتنا الثلاث هى :

$$\begin{aligned} (2 - 2) \quad s &= \bar{v}t \\ (5 - 2) \quad \bar{v} &= \frac{1}{2}(v_0 + v_f) \\ (4 - 2) \quad a &= \frac{v_f - v_0}{t} \end{aligned}$$

ولكن من غير الممكن استخدام أى من هذه المعادلات مباشرة للحصول على أحد المجهولين لأن أى معادلة تحتوى على الأقل على مجهولين ، وعليه فمن الضرورى حل المعادلات الآتية للحصول على أى مجاهيل . وفي الجزء التالى سنبين كيف نتحاشى مثل هذه الحسابات .

٢ - ٦ معادلتان مشتقتان للحركة بعجلة منتظمة :

يمكن حل المثال السابق بسهولة اذا حصلنا أولا على معادلتين مصاحبتين للمعادلات الثلاث المعطاة (٢ - ٢) ، (٤ - ٢) ، (٥ - ٢) . نستنتج هاتان المعادلتان الاضافيتان بحل المعادلات الثلاث المعلومة آنيا . وبمجرد عمل ذلك لن يتحتم علينا تكرار العملية مرة أخرى ولكن يمكننا ببساطة استخدام هذه النتائج مباشرة .

بالتعويض من المعادلة (٥ - ٢) فى المعادلة (٢ - ٢) نجد أن :

$$(6 - 2) \quad s = \frac{1}{2}(v_0 + v_f)t$$

وبالتعويض عن t من المعادلة (٤ - ٢) نحصل على :

$$(7 - 2) \quad s = \frac{1}{2}(v_f + v_0) \left(\frac{v_f - v_0}{a} \right)$$

وبتصفية الكسور وإعادة ترتيب المعادلة نجد أن :

$$(8 - 2) \quad v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

(لاحظ أن هذه هي المعادلة الواجب استخدامها لحل المثال السابق) .

أما المعادلة الأخرى التي نبحثها مفيدة فيمكن استنتاجها بإجراء تعويض آخر في المعادلة (٢ - ٦) . بالتعويض عن v_f من المعادلة (٢ - ٤) في المعادلة (٢ - ٦) نجد إذن أن :

$$s = \frac{1}{2}v_0t + \frac{1}{2}(v_0 + at)t$$

التي يمكن تبسيطها الى الصورة :

$$s = v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (٢ - ٩)$$

لدينا الآن خمس معادلات يمكن استخدامها في حل مسائل الحركة بعجلة منتظمة وهي :

$$\begin{aligned} s &= \bar{v}t \\ \bar{v} &= \frac{1}{2}(v_f + v_0) \\ v_f &= v_0 + at \\ v_f^2 &= v_0^2 + 2as \\ s &= v_0t + \frac{1}{2}at^2 \end{aligned}$$

(أ) (٢ - ١٠)
(ب) (٢ - ١٠)
(ج) (٢ - ١٠)
(د) (٢ - ١٠)
(هـ) (٢ - ١٠)

لنرجع الآن الى المسألة المذكورة في نهاية الجزء السابق . من نص المسألة نعلم أن :

$$\begin{aligned} v_0 &= 0 & a &= 4.0 \text{ m/s}^2 & s &= 20 \text{ m} \\ v_f &= ? & t &= ? \end{aligned}$$

باستخدام المعادلة (٢ - ١٠) نجد مباشرة أن :

$$\begin{aligned} v_f^2 &= 0 + (2)(4.0 \text{ m/s}^2)(20 \text{ m}) = 160 \text{ m}^2/\text{s}^2 \\ v_f &= \sqrt{160 \text{ m}^2/\text{s}^2} = \sqrt{160} \text{ m/s} \approx 12.6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ويمكننا الآن استخدام المعادلة (٢ - ١٠) لإيجاد t :

$$\begin{aligned} (4.0 \text{ m/s}^2)t &= 12.6 \text{ m/s} - 0 \\ t &= 3.15 \text{ s} \end{aligned}$$

مثال توضيحي ٢ - ٩ : اوجد الزمن اللازم لسيارة لكى تقطع 98 ft اذ بدأت من السكون وتسارعت بمعدل 4.0 ft/s^2 .

طريقة الحل : المعطيات :

$$\begin{aligned} v_0 &= 0 & a &= 4.0 \text{ ft/s}^2 & s &= 98 \text{ ft} \\ t &= ? \end{aligned}$$

المعادلة المناسبة هي :

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$98 = 0 + 2t^2$$

$$t = \sqrt{49} = 7 \text{ s}$$

يلاحظ أننا حذفنا الوحدات من هذه المعادلات ، ولكن يمكنك ادخالها واختبار ما إذا كانت وحدات t المذكورة صحيحة أم لا .

مثال توضيحي ٢ - ١٠ : كانت سيارة تتحرك بسرعة قدرها 60 km/h عندما بدأت في الإبطاء بتقاصر قدره 1.50 m/s^2 . ما الزمن اللازم للسيارة لكي تقطع مسافة 70 m أثناء إبطائها .

طريقة الحل : المعطيات :

$$v_0 = (60 \text{ km/h}) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) \left(\frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right) = 16.7 \text{ m/s}$$

$$s = 70 \text{ m} \quad a = -1.50 \text{ m/s}^2 \quad t = ?$$

لاحظ أننا قد غيرنا وحدات السرعة الى أمتار في الثانية حتى لانستخدم مجموعتين من وحدات المسافة والزمن في نفس المسألة . من الواجب دائما اجراء مثل هذا النوع من التغيير .

عند اختيار المعادلة (٢ - ١٠ هـ) لحل المسألة فإننا سنواجه تعقيدات جبرية

كثيرة :

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$70 = 16.7t + \frac{1}{2}(-1.50)t^2 = 16.7t - 0.75t^2$$

حيث سيضطر الطالب مرة أخرى الى استعمال الوحدات . يمكن حل هذه المعادلة من الدرجة الثانية باستخدام صيغة تجذير معادلات الدرجة الثانية . ومع ذلك فمن الأسهل عادة إيجاد أحد المجهولين أولاً حتى نتجنب التعقيدات الجبرية . مثلاً ، باستخدام المعادلة (٢ - ١٠ د) نجد أن :

$$v_f^2 = v_0^2 + 2as = (16.7 \text{ m/s})^2 + (2)(-1.50 \text{ m/s}^2)(70 \text{ m}) \\ = 279 \text{ m}^2/\text{s}^2 - 210 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

ومنه :

$$v_f = 8.3 \text{ m/s}$$

والآن باستخدام المعادلة (٢ - ١٠ ج) :

$$v_f = v_0 + at$$

$$8.3 = 16.7 - 1.50t$$

ضع الوحدات المناسبة في هذه المعادلة واثبت أن :

$$t = 5.6 \text{ s}$$

٢ - ٧ ملحوظة حول المعادلات

نحن لانشجع في علم الفيزياء « اقحام » القيم في معادلات محفوظة عن ظهر قلب ، والسبب في ذلك بسيط . فمن السهولة بمكان أن تحفظ عددا قليلا جدا من المعادلات عن ظهر قلب ، مع العلم بمعناها ، واستخدامها في حل جميع انواع المعادلات . وليس هناك حاجة لحفظ معادلة مختلفة لكل موقف . وحتى الآن طلبنا منك في هذا الكتاب أن تحفظ عن ظهر قلب معادلات تعريف الجيب وجيب التمام والظل فقط .

في هذا الفصل عن الحركة بعجلة منتظمة قد نسألك أيضا أن تحفظ المعادلتين (٢ - ١٠ ب) و (٢ - ١٠ جـ) عن ظهر قلب لانهما تعرفان متوسط السرعة والتسارع . أما المعادلة (٢ - ١٠ أ) فانها معادلة أساسية قد عرفناها سابقا بطريقة كيفية . ولكن هل من الضروري أن نحفظ المعادلتين (٢ - ١٠ د) و (٢ - ١٠ هـ) أم لا ؟ في الحقيقة ، يعتمد ذلك على عوامل عديدة .

هاتان المعادلتان بالطبع ماهما الا المعادلات (٢ - ١٠ أ) ، (٢ - ١٠ ب) و (٢ - ١٠ جـ) متحدة سويا بطرق مختلفة . ومع ذلك ، فان العمليات الجبرية المستخدمة في اشتقاق هاتين المعادلتين لايجب اهمالها ، فقد رأينا في أمثلة سابقة أن من الضروري استنتاج هاتين المعادلتين لحل بعض مسائل الحركة . يتلخص السؤال إذن فيمايلي : هل ستستخدم هاتين المعادلتين كثيرا لدرجة ينصح معها أن تحفظ عن ظهر قلب ؟ اظن أنك ستستخدم المعادلات الخمس (٢ - ١٠) كثيرا لدرجة أننا نفضل أن تحفظها عن ظهر قلب .

بالرغم من ذلك ، من الضروري أن نتذكر أن أية معادلة تستحق أن تحفظ فانها بالتأكيد جديرة بأن تفهم . يجب علينا أن نعلم المعنى المضبوط لكل رمز في هذه المعادلات . بالإضافة الى ذلك فان المعادلات (٢ - ١٠ أ) ، (٢ - ١٠ ب) ، (٢ - ١٠ جـ) تلخص المعاني الفيزيائية المفهومة بسهولة ولايجب أن ينظر اليها على أنها مجموعة من التعبيرات الجبرية . وقد وضعنا كذلك أن جميع المعادلات (٢ - ١٠) باستثناء الأولى تنطبق على المواقف التي يكون التسارع « فيها ثابتا .

من الجدير بالاهتمام أحيانا أن نفحص الصور الحدية لهذه المعادلات . لتبين الآن ماذا تقول المعادلات (٢ - ١٠) عندما يكون التسارع صفرا . لنأخذ أولا المعادلة (٢ - ١٠ جـ) . تقول هذه المعادلة أن $v_f = v_0$ عندما تكون $a = 0$ ، وهذا بالفعل صحيح ، فاذا كان التسارع مساويا للصفر فان السرعة تكون ثابتة ، أى أن السرعة النهائية تساوى السرعة الابتدائية . عند نفس الشرط تبين المعادلة (٢ - ١٠ ب) أن :

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_f + v_0) = v_f = v_0$$

لأن v_f و v_0 متساويتان في هذه الحالة . وهذه العلاقة صحيحة طبعاً لأنه إذا كان التسارع مساوياً للصفر فإن السرعة لا بد أن تكون ثابتة ، وكذلك لا بد أن يكون متوسط السرعة مساوياً للسرعتين الابتدائية والنهائية . بالمثل فإن المعادلتين (٢ - ١٠ د) و (٢ - ١٠ هـ) تعطيان نفس النتيجة عندما يكون $a=0$.

٢ - ٨ اكتشاف جاليليو

لن يعجب العارفون بتاريخ العلم إذا أجاب طفل اجابة خاطئة عندما تسأله : أى الكرتين احدهما تسقط أسرع من الأخرى ، الكرة الثقيلة أم الكرة الخفيفة ؟ قد يبدو معقولاً أن تسقط الكرة الثقيلة أسرع من الخفيفة ، أليس كذلك ؟ نذلك فإن معظم الأطفال يعطون هذه الاجابة .

وفي الحقيقة فإن العبقري الكبير ارسطو (٣٨٤ - ٣٢٢ قبل الميلاد) قد أعطى نفس هذه الاجابة ، ولم يكن هو الوحيد . فقد كان يظن عموماً وحتى عام ١٦٠٠ أن الاجسام الثقيلة تسقط بالفعل أسرع من الاجسام الخفيفة . علاوة على ذلك فقد كان صحيحاً أن ريش الطيور لا يسقط في الهواء بنفس سرعة سقوط الحجر ، وقد اثبت ارسطو نفسه بمناقشات فلسفية أن هذا لا بد أن يكون صحيحاً لجميع الأجسام الخفيفة بالمقارنة بالاجسام الثقيلة . (ودفاعاً عن ارسطو يجدر بنا أن ننص على أنه كان يتكلم عن طريقة سقوط الأجسام في الهواء وليس الفراغ) .

ولكن علماء العلوم الطبيعية لا يرضون تماماً بالبراهين الفلسفية للآراء التي يمكن اختبارها تجريبياً . فلو كانت الطرق الفلسفية جيدة لدرجة لا يمكن معها الشك في الاستنتاجات التي تؤدي اليها لكان ذلك شيئاً رائعاً . عندئذ كان يمكن استغلال كل الوقت والمال المخصص للأبحاث العلمية الباهظة التكاليف في أوجه أخرى ولأمكن لقليل من الفلاسفة الذين يعيشون منعزلين عن العامة في أبراج عاجية فاخرة مجهزة بالسجاجيد المخملية أن يحلوا جميع المشاكل العلمية .

أما جاليليو (١٥٦٤ - ١٦٤٢) فقد كانت لديه الشجاعة والجرأة ليتساءل عما إذا كان ارسطو قد ارتكب خطأ في مناقشاته الفلسفية . وقد يبدو لنا الآن من غير المشجع أن أحداً لم يحاول أن يجهد نفسه باجراء الاختبارات التجريبية البسيطة اللازمة للاجابة على هذا السؤال طوال تسعة عشر قرناً . ومع ذلك كان جاليليو أن يقيس السرعة التي تسقط بها الأجسام* . وقد أدرك أن تلك المواقف مثل مسألة سقوط

* أمكن لجاليليو بالفعل زيادة زمن السقوط بدرجة الكرات على مستوى مائل . ويجعل المستوى أكثر انحداراً ومشاهدة تأثير هذا الاجراء تمكن جاليليو من الحصول على استنتاجات كمية عن سلوك الأجسام أثناء السقوط الذاتي .

رهشة الطائر والحجر لم تكن اختبارا حقيقيا نظرا للتأثير الكبير لدفع الهواء للريشة أثناء سقوطها . لذلك فانه أجرى تجاربه باستخدام أجسام ثقيلة نسبيا متساوية في الحجم ومختلفة في الوزن ، وبالطبع فان نتائجه معروفة جيدا . وقد استنتج أنه اذا اهملت التأثيرات الاحتكاكية للهواء فان جميع الأجسام تسقط على الأرض بنفس الطريقة بصرف النظر عن وزنها .

يسمى جاليليو عادة أبا العلم الحديث لأنه كان ذا أثر في توجيه انتباه العالم الى أن التخریب - أى اجراء التجارب العلمية - عندما يكون ممكنا ، هو احد الطرق لتعلم الحقائق من الطبيعة . ويتبع خطاه فتح العالمان الكبيران نيوتن وفاراداي وكثيرون غيرها آفاقا جديدة كاملة للمعرفة بقياساتهم التجريبية لطرق الطبيعة .

وحتى في وقتنا الحاضر نجد أحيانا بعض العلماء يتبعون طريقة ارسطو وليس جاليليو ، اذ لازلنا نجد ، بالمناسبة ، أن التجارب تدحض الافكار التي كنا نظنها متينة الأساس . وأحيانا لا يمكن الحصول على البراهين التجريبية لانها تتطلب طرقا فوق امكانياتنا . ولكن ، على أى حال ، لا يجب على العلماء أن ينسوا أنه حتى أحسن العقول تخطئ أخطاء فلسفية .

ومع ذلك ، هناك وجه آخر للعملة . في كثير من المجالات تكون الاثباتات والبراهين التجريبية غير الممكنة لسبب أو لآخر . ففي مثل هذه الحالات ليس هناك بديل آخر الا أن نعتمد على استنتاجات أكثر فلاسفتنا قدرة . وحتى اذا كانت الاختبارات التجريبية ممكنة فقد يضطر العلماء الى تأجيلها بسبب ضغط المهام الأخرى أو التكاليف الباهظة . وسنرى في فصول لاحقة أن بعضا من أعظم الاكتشافات والنظريات العلمية لم تكن مبنية على أسس غير محققة ، بل كانت مبنية على أسس غير صحيحة . ولكن حقيقة أن الاكتشافات التي قد تمت تعتبر بمثابة تبرير معقول للطريقة التي اتبعها العالم . وبالتأكيد فانه لم يكن قادرا على برهان فروضه الابتدائية فلو أنه أنفق سنوات كثيرة في هذا البرهان لتأخر الاكتشاف قرنا كاملا . وبالطبع فاننا نميل الى أن نتذكر هؤلاء العلماء الذين كانوا محظوظين في هذا الاسلوب . أما أولئك الذين فشلوا بسبب مقدمات خاطئة أو غير مثبتة فانهم ينسون سريعا بالرغم من أن عددهم كبير جدا بالتأكيد .

٢ - ٩ السقوط الطليق وتسارع الجاذبية

كرر كثير من العلماء التجريبيين تجارب جاليليو باستخدام أساليب تقنية متطورة للغاية ، لذلك فمن المستبعد أن تقوم في عملك المعملى باجراء تجربة لتحقيق نتائجه . ومن الحقائق المسلم بها الآن أن الجسم الذى يسقط ذاتيا يتسارع الى أسفل بتسارع ثابت . وبالرغم من أن القيمة المضبوطة لهذا التسارع الناتج من جذب الجاذبية الأرضية يختلف من مكان الى مكان على الأرض فانه قريب من القيمة $9.8 m/s^2$ وهو مايساوى $980 cm/s^2$ أو $32.2 ft/s^2$ ، ويوضح الجدول

٢ - ١ بعض القيم النموذجية . وبالطبع فإن هذه النتائج تفترض أن عناية كبيرة قد أوليت لتقليل تأثير اندفاع الهواء على الجسم الساقط الى الحد الأدنى .

تعتبر حركة الجسم الحر في الاتجاه الى أعلى أو الى أسفل حركة منتظمة التسارع ، فالتسارع في هذه الحالة ثابت ويساوى 9.8 m/s^2 تقريباً* . بناء على ذلك تنطبق المعادلات (٢ - ١٠) ، على هذه الحالة ومعروف أن a تساوى 9.8 m/s^2 أو 32 ft/s^2 أو 980 cm/s^2 . هناك أيضا احتياطات اضافية أخرى يجب وضعه في الاعتبار عند استخدام هذه المعادلات وهو يتعلق بالطبيعة الموجهة للتسارع . تسارع الجاذبية تتجه دائما الى أسفل . فإذا اخترنا الاتجاه الى أسفل كاتجاه موجب فإن a ستكون عددا موجبا ، 9.8 m/s^2 . أما اذا اخترنا الاتجاه الى أعلى كاتجاه موجب فإن جذب الجاذبية الأرضية سيقول سرعة الجسم في الاتجاه الى أعلى ، وعليه فإن $a = -9.8 \text{ m/s}^2$. وفي المسائل التي تحتوي على حركة في الاتجاهين الى أعلى وإلى أسفل ، مثل حركة كرة ترتفع الى أعلى ثم تهبط الى أسفل ، من الضروري جدا في البداية اختيار أحد الاتجاهين الى أعلى أو الى أسفل كاتجاه موجب . هذا الاختيار عشوائي ، ولكن بمجرد اجراء هذا الاختيار في مسألة معينة يجب علينا الاحتفاظ به في المسألة كلها .

تسارع الجاذبية g جدول ٢ - ١

المكان	الارتفاع ، m	g	
		m/s^2	ft/s^2
بوفورت	1	9.7973	32.143
نيو أورليانز	2	9.7932	32.130
جالتستون	3	9.7927	32.128
سييتل	58	9.8073	32.176
سان فرانسيسكو	114	9.7997	32.151
سان لويس	154	9.8000	32.152
كلفلاند	210	9.8024	32.160
دنفر	1638	9.7961	32.139
بايكس بيك	4293	9.7895	32.118

مثال توضيحي ٢ - ١١ : اسقط صبي حجرا من فوق الكوبري . فاذا أخذ الحجر زمنا قدره 3.0 s ليصطدم بالماء تحت الكوبري فما ارتفاع الكوبري عن الماء ؟ اهل احتكاك الهواء . (لاحظ هنا أن مسألتنا تنتهي في اللحظة التي تسبق اصطدام الحجر بالماء مباشرة ، لأن هذه هي في الواقع الفترة التي يسقط فيها الجسم (الحجر) سقوطا ذاتيا) .

* لحل المسائل في هذا الكتاب سنستخدم القيم التقريبية 32 ft/s^2 و 9.8 m/s^2 كقيم لتسارع الجاذبية g

طريقة الحل : المعطيات :

$$s = ? \quad \text{الاتجاه الموجب لأسفل} \quad a = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$t = 3.0 \text{ s} \quad v_0 = 0$$

استخدام العلاقة

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$= 0 + \frac{1}{2} (9.8 \text{ m/s}^2) (3 \text{ s})^2 = 44 \text{ m}$$

شكل (٢ - ٥)

قذفت الكرة الى أعلى من النقطة A بسرعة قدرها 15 m/s وحيث أن الكرة تقف عند B فان سرعتها الى أعلى تساوى صفراً في هذا المكان .

مثال توضيحي ٢ - ١٢ : قذفت فتاة كرة الى أعلى بسرعة قدرها 15 m/s . ماهو أقصى ارتفاع تصل اليه الكرة ؟ وماهى سرعتها قبل أن تتلقفها الفتاة مرة ثانية ؟ ماهو الزمن الذى تقضيه الكرة فى الهواء ؟ اهمل تأثير احتكاك الهواء .

طريقة الحل : الطريقة ١ : من المهم تعريف « الرحلة » التى ندرسها . اعتبر الحركة من A الى B فى شكل ٢ - ٥ . المعطيات :

$$s = ? \quad \text{الاتجاه الموجب الى أعلى} \quad a = -9.8 \text{ m/s}^2$$

$$v_0 = 15 \text{ m/s} \quad v_f = 0$$

استخدم العلاقة

$$2as = v_f^2 - v_0^2$$

$$-19.6s = 0 - 225$$

ضع الوحدات فى هذه المعادلة واثبت أن :

$$s = 11.5 \text{ m} \quad \text{من A الى B}$$

لاحظ أن سرعة الكرة الى أعلى قد تناقصت الى الصفر عند قمة المسار وهو النقطة B .

وحيث أنها لم تبدأ بعد فى السقوط الى أسفل مرة ثانية فان سرعتها الى أسفل تساوى صفراً أيضاً عند هذه النقطة B .

فى الجزء الثانى من المسألة سنهتم بالرحلة من B الى C وهذه رحلة جديدة ، لذلك سيكون لدينا معطيات جديدة . المعطيات :

$$v_f = ? \quad \text{الاتجاه الموجب الى أسفل} \quad a = +9.8 \text{ m/s}^2$$

$$s = 11.5 \text{ m}$$

$$v_0 = 0$$

استخدم العلاقة :

$$2as = v_f^2 - v_0^2$$

$$(19.6 \text{ m/s}^2)(11.5 \text{ m}) = v_f^2 - 0$$

$$v_f = \sqrt{225} = 15 \text{ m/s} \quad \text{الى أسفل}$$



لاحظ أن السرعة النهائية هي نفس السرعة التي قذفت بها الكرة . هذا المثال هو مثال مشهور لقانون أساسي في الفيزياء يسمى **قانون بقاء الطاقة** وهو ماسندرسه بتفصيل واف في فصل لاحق .

الطريقة ٢ : لازالت هناك طريقة أخرى كان من الممكن استخدامها لحل المسألة الأخيرة . لندرس الرحلة الكلية من A الى B ثم الى C . وكما هو واضح فان نقطة البداية هي A ونقطة النهاية هي C لناخذ الاتجاه الى أعلى كاتجاه موجب . المعطيات :

$$a = -9.8 \text{ m/s}^2 \quad v_0 = 15 \text{ m/s} \quad s = 0$$

$$v_f = ? \quad t = ?$$

يمكننا القول أن الازاحة الموجهة s من نقطة البداية A الى نقطة النهاية C تساوى صفرا لأن الكرة قد عادت الى الفتاة التي قذفتها . استخدم العلاقة :

$$2as = v_f^2 - v_0^2$$

$$0 = v_f^2 - (15 \text{ m/s})^2$$

$$v_f = \pm 15 \text{ m/s} \quad \text{كما سبق}$$

لاحظ عند أخذ الجذر التربيعي لعدد معين أن الاجابة قد تكون موجبة أو سالبة . وفي رحلتنا هذه تكون الاشارة السالبة هي الصحيحة . وقبل مناقشة سبب اختيار احدى الاجابتين لنحسب الزمن اللازم للرحلة . استخدم العلاقة :

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$0 = 15t - 4.9t^2$$

ضع التوحدات في هذه المعادلة واثبت أن :

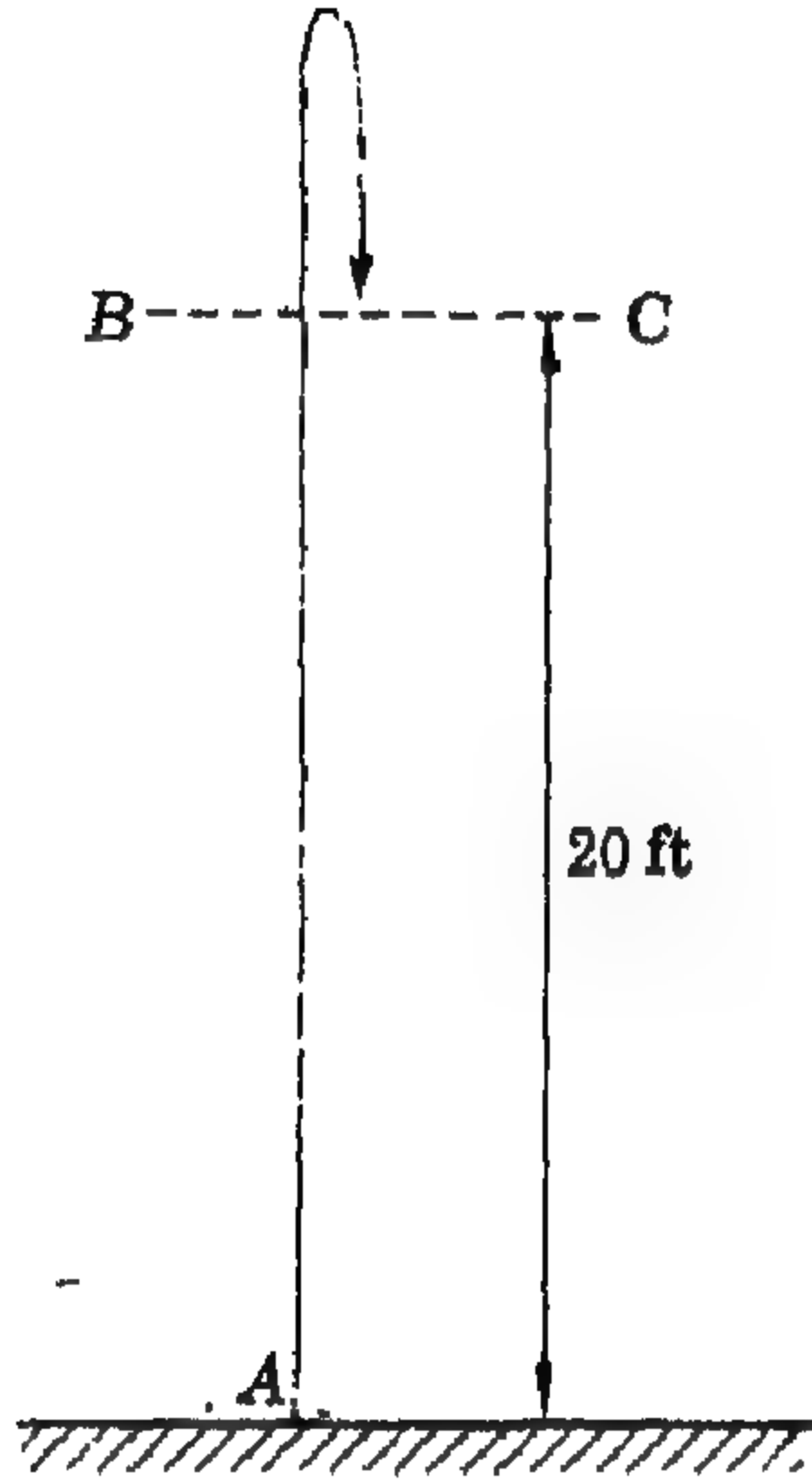
$$t = 0 \quad t = 3.1 \text{ s}$$

هنا أيضا علينا أن نختار احدى الاجابتين .

ليس صعبا أن نختار احدى الاجابتين في كل حالة . معطياتنا في هذه الطريقة للحل صحيحة فعلا للرحلتين وهما الرحلة من A الى B ثم الى C وكذلك للرحلة من A والتي تنتهى بعد بدايتها مباشرة . وتعتبر الشروط المعطاة صحيحة بالنسبة لهذه الرحلة الأخيرة ، والزمن اللازم لها يساوى صفرا . بالاضافة الى ذلك فان السرعة النهائية لازالت تساوى السرعة الابتدائية .

مثال توضيحي ٢ - ١٣ : قذفت كرة الى أعلى بسرعة قدرها 40 ft/s كما هو موضح في شكل ٢ - ٦ ماهو الزمن اللازم لكي تصل الى نقطة على ارتفاع 20 ft من الأرض أثناء عودتها الى أسفل مرة ثانية ؟ اهمل تأثيرات الهواء المحيط .

طريقة الحل : المعطيات :



شكل (٢ - ٦)
قذفت الكرة الى أعلى من
النقطة A بسرعة قدرها
 40 ft/s ماهو الزمن اللازم
لكي تصل الكرة الى النقطة
 C ؟

$$a = -32 \text{ ft/s}^2 \quad t = ? \quad \text{الاتجاه الموجب الى أعلى}$$

$$s = 20 \text{ ft} \quad v_0 = 40 \text{ ft/s}$$

إذا استخدمنا المعادلة $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ سنحتاج الى صيغة تجذير معادلات الدرجة الثانية لإيجاد t . بدلا من ذلك نوجد أولا v_f باستخدام :

$$2as = v_f^2 - v_0^2$$

$$(-64 \text{ ft/s}^2)(20 \text{ ft}) = v_f^2 - 1600 \text{ ft}^2/\text{s}^2$$

$$v_f^2 = 320 \text{ ft}^2/\text{s}^2$$

$$v_f = \pm 17.9 \text{ ft/s}$$

هنا لابد أن نختار الإشارة السالبة لأننا نهتم بالكرة عند وصولها الى النقطة C في طريق عودتها الى أسفل. أما الإشارة الموجبة فانها تمثل الكرة عند النقطة B في طريق صعودها الى أعلى. والآن استخدم

$$v_f = v_0 + at$$

$$-17.9 \text{ ft/s} = 40 \text{ ft/s} - (32 \text{ ft/s}^2)t$$

$$32t = 57.9$$

ضع الوحدات في هذه المعادلة واثبت أن :

$$t = 1.81 \text{ s}$$

مثال توضيحي ٢ - ١٤ : بأى سرعة يجب قذف الكرة الى أعلى في خط مستقيم بحيث تصل الى القاذف بعد زمن قدره 3.0 s ؟ أهمل تأثيرات الهواء على الكرة .

طريقة الحل : لنستخدم النظام المتري للوحدات في هذه المسألة . لنعتبر أن الاتجاه الى أعلى هو الاتجاه الموجب ونلاحظ أن طول متجه الازاحة من نقطة البداية الى نقطة النهاية يساوى صفرا . اذن :

$$a = -9.8 \text{ m/s}^2$$

$$t = 3.0 \text{ s} \quad s = 0 \quad v_0 = ?$$

يمكن استخدام العلاقة :

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

لنحصل على :

$$0 = (v_0)(3 \text{ s}) - (4.9 \text{ m/s}^2)(9 \text{ s}^2)$$

وهكذا نجد أن :

$$v_0 = 14.7 \text{ m/s}$$

ملخص :

متوسط معدل حركة الجسم \bar{v} هو المسافة الكلية المقطوعة مقسومة على الزمن الذى تأخذه الرحلة . ومتوسط سرعة الجسم \bar{v} هو متجه الازاحة من بداية الرحلة الى نهايتها مقسوما على الزمن اللازم لقطع الرحلة . معدل الحركة كمية قياسية والسرعة متجه . وحدات كل منهما عبارة عن وحدات المسافة مقسومة على الزمن .

عندما يتحرك جسم فى خط مستقيم فان حركته يمكن تمثيلها على صورة علاقة بيانية بين x و t . ميل الخط المستقيم الذى يمثل هذه العلاقة عند أى نقطة هو السرعة ومعدل الحركة عند هذه النقطة . تعطى السرعة اللحظية بالعلاقة :

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

تستخدم معاملات التحويل لتغيير وحدات الكمية . وكل معامل تحويل يساوى الوحدة لذلك فان ضرب الكمية فى معامل التحويل لا يغير قيمة هذه الكمية . تعامل الوحدات فى الحسابات مثل الرموز الجبرية بالضبط .

اذا تغيرت سرعة الجسم من v_0 الى v_f فى زمن قدره t فان متوسط التسارع يعطى بالعلاقة :

$$\bar{a} = \frac{\text{التغير فى السرعة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{v_f - v_0}{t}$$

الازاحة عبارة عن متجه .

اذا تحرك جسم فى خط مستقيم وكان تسارعه ثابتا فان متوسط سرعة الجسم تعطى بالعلاقة :

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_f + v_0)$$

وباستخدام العلاقة السابقة وتعريف متوسط السرعة نجد أن :

$$\bar{v} = \frac{s}{t}$$

كذلك فان متوسط التسارع هو :

$$\bar{a} = a = \frac{v_f - v_0}{t}$$

يمكن اشتقاق معادلتين مفيدتين اضافيتين وهما :

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad \text{و} \quad v_f^2 = v_0^2 + 2 a s$$

تجذب الأرض جميع الأجسام الى أسفل بقوة تسمى وزن الجسم . واذا كانت هذه القوة هى القوة الوحيدة التى تؤثر على الجسم يقال عندئذ أن الجسم يسقط سقوطا ذاتيا . تكتسب الأجسام التى تسقط سقوطا ذاتيا التسارع g فى اتجاه مركز الأرض . قيمة تسارع الجاذبية g هى 9.8 m/s^2 وهو مايساوى 32.2 ft/s^2 .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل التالى :

- ١ - تعريف متوسط معدل الحركة ومتوسط السرعة . اعطاء أمثلة توضح أن مقدارى السرعة ومعدل الحركة يكونان أحيانا مختلفين .
- ٢ - استخدام الرسم البيانى الذى يمثل العلاقة بين x و t لوصف سلوك الجسم . تفسير ميل الرسم البيانى بدلالة السرعة ومعدل الحركة اللحظيين . التفريق بين متوسط السرعة والسرعة اللحظية .

- ٣ - تغيير وحدات الكمية من نظام الى آخر عند معرفة علاقات تحويل الوحدات .
- ٤ - تعريف متوسط التسارع بالكلمات ومعادلة رياضية . اعطاء بعض وحدات التسارع الممكنة .
- ٥ - رسم علاقة بيانية تمثل العلاقة بين v و t لجسم يتحرك بتسارع ثابت (منتظم) معلوم .
- ٦ - كتابة معادلات الحركة منتظمة التسارع الخمس . تعريف كل رمز في هذه المعادلات . ذكر شروط استخدام كل معادلة .
- ٧ - إيجاد مجهول أو مجهولين لجسم يتحرك بتسارع منتظم عند معرفة المعطيات الكافية .
- ٨ - تعريف تسارع الجاذبية g وذكر قيمتها التقريبية على الأرض .
- ٩ - إيجاد مجهول أو مجهولين لحالة الجسم الذى يتحرك حركة رأسية أثناء السقوط الذاتى على الأرض عند معرفة المعطيات الكافية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

متوسط معدل الحركة	السرعة بدلالة الميل
متوسط السرعة	تسارع السقوط الذاتى g
اختلاف المسافة عن الازاحة	معادلات الحركة المنتظمة الخمس
متوسط التسارع	ضرورة اختيار اتجاه موجب
معدل الحركة والسرعة اللحظيين	معامل التحويل

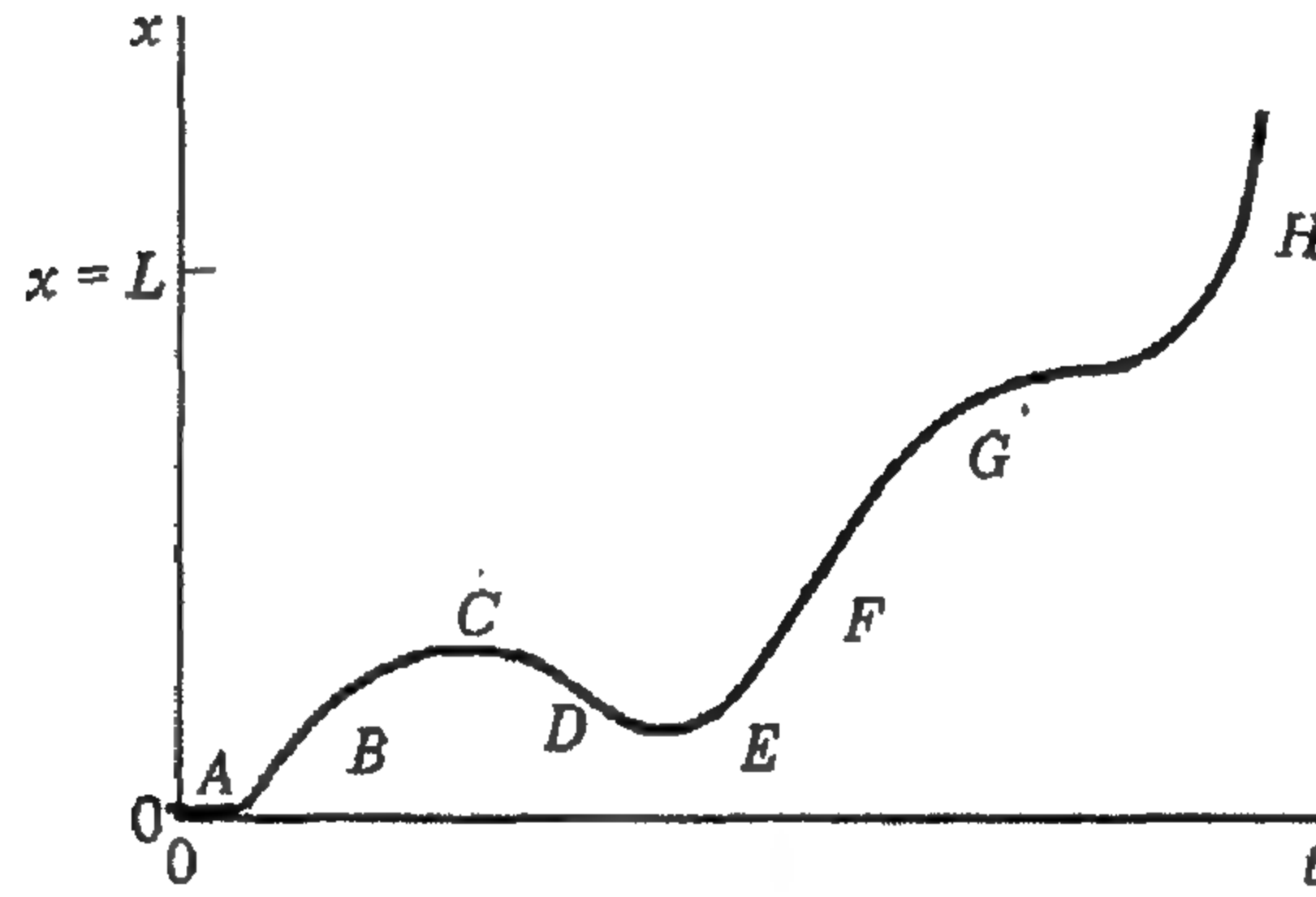
اسئلة وتخمينات

- ١ - اذكر مثلا تكون فيه سرعة الجسم مساوية للصفر بينما لا يكون تسارعه مساويا للصفر .
- ٢ - هل يمكن أن يكون اتجاه سرعة الجسم مختلفا عن اتجاه تسارعه ؟ اشرح ذلك .
- ٣ - ارسم الرسمين البيانيين الذين يمثلان السرعة والتسارع كدالة للزمن لسيارة تصطدم بعمود حمل الأسلاك التليفونية . كرر العمل لكرة بلياردو تصطدم اصطداما مستقيما (مباشرة) مع حافة منضدة البلياردو .
- ٤ - اعتبر أن صاروخا صغيرا قد اطلق في خط مستقيم الى أعلى . ارسم الرسمين البيانيين اللذين يمثلان السرعة والتسارع كدالة للزمن للصاروخ أثناء ارتفاعه ثم أثناء سقوطه الى الأرض بفرض أنه يبدأ من السكون ويتسارع بانتظام حتى تمام استنفاد الوقود .
- ٥ - دخل فأر احدى نهايتى ماسورة مجارى طولها L وكانت حركته ابتداء من تلك اللحظة كما هو مبين في شكل م ٢ - ١ . صف حركة الفأر بالكلمات .
- ٦ - قذف حجر في الهواء رأسيا الى أعلى ، فوصل الى ارتفاع h ثم عاد مرة أخرى الى القاذف . ارسم العلاقات البيانية التى تبين تغير v مع t و a مع t و t مع t فى الفترة التى كان الحجر موجودا فيها فى الهواء .
- ٧ - تقطع فتاة بالمرحلة الثانوية مسافة 100-yd dash باكمال مسار دائرى طول محيطه 50 yd فى حديقة منزلها . قدر متوسط معدل حركة الفتاة ومتوسط سرعتها باعتبارها عداء متوسط القدرة (ق) .
- ٨ - هل تسقط جميع الأجسام على الأرض بنفس التسارع ؟ اشرح ذلك .
- ٩ - اسقطت سيدة مفاتيح سيارتها فى المصعد الذى كانت واقفة فيه . وفى نفس اللحظة انقطع سلك المصعد وسقط المصعد فى مجراه الرأسى سقوطا حرا . ماذا يحدث للمفاتيح .
- ١٠ - رأى سائق سيارة طفلا مندفعاً فى الطريق الذى يسير فيه مباشرة ، وكانت سرعة السيارة هي 200 m/s . ما هى المسافة التى تقطعها السيارة قبل أن يضغط السائق على الفرامل و (ق) (سنرى فى الفصل الرابع أن السيارة سوف تنزلق بعد الضغط على الفرامل) .

- ١١ - تسارع الجاذبية على القمر يساوى حوالى 1.6 m/s^2 . قدر الى أى ارتفاع يمكنك أن تقذف كرة بيسبول رأسيا الى أعلى على القمر .
(افترض أن بذلة الفضاء التى ترتديها لا تسبب أى إعاقة) . (ق) .
- ١٢ - ماهو الحد الأقصى لمتوسط تسارع سيارة قياسية فى المدى من 0 إلى 40 mi/h ؟ (ق)
- ١٣ - افترض أنك تجرى بسرعة قدرها 5 m/s فى منتزة أخضر . قدر أقل مسافة يمكنك التوقف فيها دون أن تصطدم بشيء ما . وباستخدام تقديرك أوجد تقاصرك ، أى تسارعك السالب . (ق) .

مسائل :

- افترض أن التسارع منتظم ما لم ينص على غير ذلك . اعتبر أن $g = 9.8 \text{ m/s}^2 = 32 \text{ ft/s}^2$. أهمل احتكاك الهواء .
- ١ - فى عام ١٩٠٤ سجل هنرى فورد رقما قياسيا عالميا للميل ، فقد قطع هذه المسافة فى سيارة فورد « ٩٩٩ » فى زمن قدره 39.4 s .
ما هو متوسط معدل الحركة بالميل فى الساعة والكيلومتر فى الساعة ؟



شكل (م ٢ - ١)

- ٢ - فى دورة ١٩٣٢ للألعاب الأولمبية كسب الفنلندى سباق 3000 m حواجز اذ قطع مسافة 3450 m فى زمن قدره $10 \text{ min } 33.4 \text{ s}$.
(جرى العداءون مسافة اضافية خطأ فى القياس) . ماهو متوسط معدل حركته بالمتر فى الثانية ؟ وما هو متوسط سرعته ؟
- ٣ - مازالت القشرة الأرضية فى طور التكيف نظرا لفقد الثلج منذ العصر الجليدى الأخير . لذلك فان منطقة ليك سوبيريور مازالت ترتفع بمعدل قدره حوالى 16 ft لكل 1000 yr . اوجد معدل الحركة نتيجة لذلك بالسنتيمترات فى السنة . اوجد متوسط السرعة بالسنتيمترات فى القرن .
- ٤ - طبقا لنظرية زحزحة القارات كانت أمريكا الجنوبية فى وقت ما متصلة بأفريقيا ، وقد استمرت زحزحة هاتين القارتين متباعدتين لحوالى $200 \text{ million years}$ حتى بلغ انفصاليهما فى الوقت الحاضر حوالى 4000 mi . بفرض أن هذين الرقمين مضبوطين ، ماهو متوسط معدل انفصال هاتين القارتين بالسنتيمترات فى السنة ؟
- ٥ - بالرجوع الى شكل م ٢ - ٢ الذى يبين حركة جسم ما فى خط مستقيم . اوجد متوسط سرعة هذا الجسم فى الفترات التالية : (أ) من A الى E (ب) من B الى E ، (جـ) من C الى E ، (د) من D الى E ، (هـ) من C الى D .
- ٦ - يستطيع A أن يجرى بمعدل حركة قدره 5.0 m/s بينما يستطيع B أن يجرى بمعدل حركة قدره 3.0 m/s فقط . تسابق A و B مسافة 200 m ولكى يكون السباق اكثر تعادلا طلب A أن يبدأ بعد $t \text{ seconds}$ من لحظة انطلاق B . ما قيمة t اذا اريد أن يصل المتسابقان فى نفس اللحظة الى نقطة النهاية ؟
- ٧* - يمكن اجراء السباق المذكور فى المسألة ٦ بالطريقة التالية . يبدأ B السباق من نقطة تبعد s من نقطة البداية ، بينما يبدأ A السباق من نقطة البداية ليجرى المسافة الكلية 200 m وتعطى اشارة البدء لكليهما فى نفس اللحظة . ما قيمة s اللازمة لكى يصل المتسابقان الى نقطة النهاية فى نفس اللحظة ؟

٨ - يمثل الشكل م ٢ - ٢ حركة جسم ما في خط مستقيم . اوجد السرعة اللحظية للجسم (أ) عند النقطة F ، (ب) عند النقطة B ، (ج) عند النقطة E .

٩ - يطالب صانع سيارات أن تصل سيارته الى سرعة قدرها 28 m/s بعد زمن قدره 20 s من لحظة انطلاقها من السكون . اوجد متوسط تسارع السيارة والمسافة التي تقطعها في هذا الزمن .

١٠ - القيمة التقريبية لتقاصر سيارة متزحلقه هو 7.0 m/s^2 . باستخدام هذه القيمة احسب الزمن لسيارة تسير بسرعة قدرها 30 m/s لكي تقف بعد بداية التزحلق . ماهي المسافة التي تقطعها السيارة في هذا الزمن ؟

١١ - تتحرك رصاصة بمعدل حركة قدره 150 m/s لتصيب شجرة فتنفذ فيها مسافة 3.5 cm قبل وقوفها . اوجد تقاصر الرصاصة والزمن اللازم لوقوفها .

١٢ - في انبوبة التليفزيون تتحرك الالكترونات بسرعة كبيرة لتتصادم بالمادة الفلورية الموجودة على الستار في نهاية الانبوبة . ويسبب اصطدامها بهذه المادة انبعاث الضوء لتنتج الصورة التي نراها . في هذه الانبوبة تتسارع الالكترونات من السكون الى معدل حركة قدره 200 million meters per second في مسافة قدرها حوالي 1.5 cm (يمكن كتابة معدل الحركة على الصورة $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ باستخدام التدوين المشروح في ملحق ٢) . ماهو تسارع الالكترونات في خلال عملية التسارع ؟ ماالزمن اللازم لعملية التسارع ؟

١٣* - سد قطار محمل بمحمولة كبيرة تقاطعا (مزلقانا) فاضطر أحد سائقي السيارات الى التوقف والانتظار حتى ينتهي عبور القطار . وقد لاحظ هذا السائق أن عربة السكة الحديد تحتاج 20 s لكي تعبر التقاطع تماما عندما يبدأ القطار الحركة من السكون . اوجد تسارع القطار بدلالة طول عربة السكة الحديد Z . وبفرض أن التسارع يظل ثابتا ، اوجد الزمن اللازم لعبور عربات السكة الحديد التالية وعددها 60 بعد أن يبدأ القطار في الحركة .

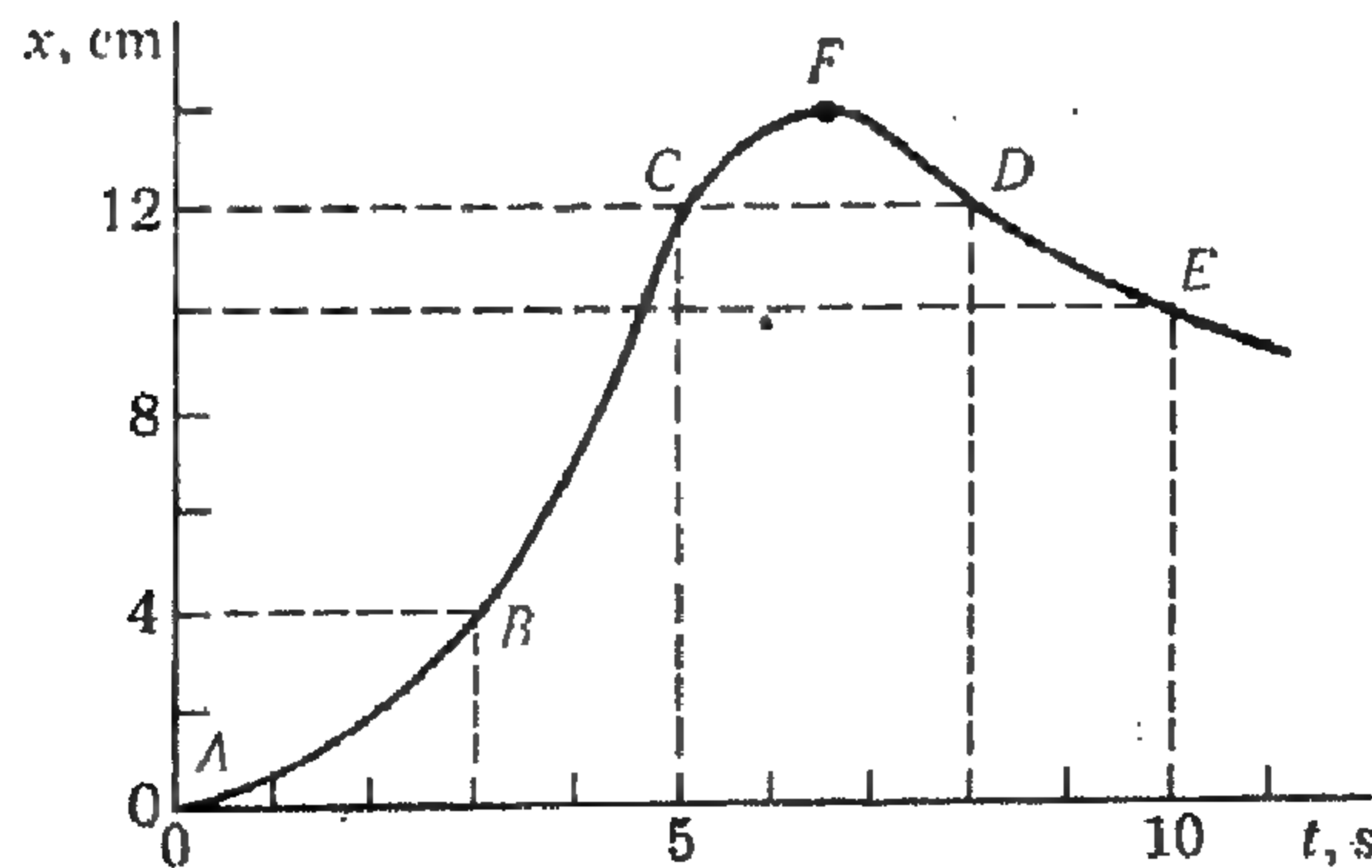
١٤ - تسير شاحنة بسرعة ابتدائية قدرها 50 ft/s وتبطيء سرعتها بتقاصر قدره 4 ft/s^2 . اوجد (أ) الزمن الذي تأخذه للوقوف ، (ب) المسافة التي تقطعها في هذا الزمن ، (ج) المسافة التي تقطعها الشاحنة في الثانية الثالثة بعد الضغط على الفرامل .

١٥ - قذف حجر رأسيا الى أعلى بسرعة ابتدائية قدرها 80 ft/s . اوجد أقصى ارتفاع يصل اليه الحجر والزمن اللازم للوصول الى هذا الارتفاع .

١٦ - قذف طفل كرة رأسيا الى أسفل من قمة مبنى ارتفاعه 50 ft بسرعة قدرها 20 ft/s . ماهو الزمن اللازم لكي تصل الكرة الى الأرض وسرعتها قبل أن تصطدم بها .

١٧ - اطلقت رصاصة من بندقية رأسيا الى أعلى فوجد أنها تصل الى ارتفاع 2 km . ماهي أقل سرعة ممكنة لانطلاق الرصاصة من البندقية حتى تصل الى هذا الارتفاع ؟ (احتكاك الهواء هام من الناحية العملية) .

١٨ - قذف حجر رأسيا الى أعلى من سطح الأرض فوصل الى ارتفاع يساوي ارتفاع مبنى قريب ثم عاد الى الأرض بعد 3.0 s من لحظة القذف ماالارتفاع هذا المبنى بالأمتار ؟



شكل (م ٢ - ٢)

١٩ - تقف فتاة على الحافة العليا لمبنى ارتفاعه 18 m من سطح الأرض فإذا نقرت هذه الفتاة قطعة عملة معدنية نفرة خفيفة الى أعلى بسرعة قدرها 7.0 m/s ، فما هو الزمن اللازم لكي تصل قطعة العملة الى سطح الأرض ؟ وماهى سرعة قطعة العملة قبل اصطدامها بالأرض مباشرة ؟

٢٠* طالب فيزياء يستخدم آلة حاسبة لإيجاد قيمة 2×2 توصل الى الطريقة التالية لقياس ارتفاع احد المباني . يسقط حجر من قمة المبنى الى الأرض ثم يقاس الزمن اللازم لكي يقطع الحجر المسافة 2.0 m الأخيرة قبل ان يصطدم بالأرض وذلك باستخدام جهاز توقيت . وقد وجد الطالب بالتجربة أن الجسم الذى اسقطه من قمة المبنى قد أخذ زمنا قدره 0.150 s لقطع المسافة 2.0 m الأخيرة . ما ارتفاع هذا المبنى ؟

٢١ - تتحرك شاحنة بسرعة قدرها 15 m/s فى الاتجاه الغربى فى مسار الاصطدام بسيارة تتحرك فى الاتجاه الشرقى بسرعة قدرها 30 m/s وكانت المسافة بين السيارتين 400 m . ماهو الزمن اللازم لاصطدامهما ؟ على أى مسافة تبعد كل سيارة عن موضعها الأسمى عندما يحدث التصادم ؟ افترض أن سرعتى السيارتين تظلان ثابتتين .

٢٢** - تسير سيارة بسرعة قدرها 60 mi/h فى طريق مواز لخط السكة الحديد . ماهو الزمن اللازم للسيارة لكي تحتاز قطارا طوله $\frac{1}{2}$ mi يتحرك بسرعة قدرها 40 mi/h فى نفس الاتجاه ؟ وماهو الزمن اللازم لذلك اذا كان القطار يتحرك فى الاتجاه المعاكس ؟

٢٣** - لاحظ سائق سيارة أن سرعة سيارته 30 m/s فى المنطقة المخصصة للسرعة 20 m/s ، وفى نفس اللحظة شاهد سيارة شرطة محتفية خلف شجرة . وعلى أمل ألا يكون رجال الشرطة مزودين بجهاز رادار قياس السرعة رفع السائق قدمه فجأة عن دواسة البنزين . فاذا علمت أن رجال الشرطة يقومون برصد سرعة السيارات بين نقطتى مراجعة تبعد كل منها عن الأخرى مسافة 150 m وكانت نقطة المراجعة الأولى منطقة على النقطة التى اعتقت فيها دواسة البنزين ، فبأى تقاصر يجب أن تسير السيارة لكي يسجل رجال الشرطة سرعة قدرها 20 m/s ؟

٢٤** - يريد صبي أن يقذف علبة من الصفيح رأسيا الى أعلى فى الهواء ثم يضربها بعلبة أخرى ، وكان يريد أن يحدث التصادم على ارتفاع 5.0 m من نقطة القذف . بالإضافة الى ذلك يعلم الصبي أن الزمن الذى يحتاجه بين لحظتى القذف هو 3.0 s . بفرض أن الصبي يقذف العلبتين بنفس السرعة ، فما هى السرعة الابتدائية الضرورية لقذف العلبتين ؟

٢٥*** - تقف سيدة فى مصعد يتحرك رأسيا الى أعلى بسرعة قدرها 4.0 m/s . فاذا اسقطت السيدة قطعة عملة معدنية من ارتفاع 1.2 m فوق أرضية المصعد ، فما هو الزمن اللازم لقطعة العملة لكي تصدم بالأرضية ؟ وماهى سرعة قطعة العملة بالنسبة الى أرضية المصعد قبل التصادم مباشرة ؟

* مسائل أكثر صعوبة قليلا من المتوسط .
** تحتاج هذه المسائل الى براعة أكبر كثيرا من المسألة المتوسطة .

الفصل الثالث

القوى والحركة الخطية

فى الفصل السابق ناقشنا مفهوم السرعة والتسارع دون التعرض الى مايسبب حركة الاجسام على وجه التخصيص . وقد أجلنا دراسة دور القوى فى احداث الحركة الى هذا الفصل . سندرس الآن كيف تسبب القوى تسارع الاجسام ، وفى أثناء هذه الدراسة سنذكر ونناقش قوانين نيوتن الثلاثة للحركة وسنجد أن هذه القوانين ذات أهمية اساسية فى علم الفيزياء .

٣ - ١ اكتشاف القوانين الفيزيائية

القانون الفيزيائي هو تعبير عن الطريقة التي تتصرف بها المادة وهي قوانين لاسيطرة لنا عليها فقد وجدت منذ الأزل وستوجد الى الابد. والغرض من جميع الابحاث الاساسية في العلوم الفيزيائية هو اكتشاف هذه القوانين . فالفهم في العلم يكافئ معرفة قوانين الطبيعة ونتائجها .

وبالرغم من أن الناس يخطئون احيانا فيما يظنون أنه القوانين الفيزيائية ، فان الصيغ غير الصحيحة التي يعتقدون أنها قوانين الطبيعة ليست بالطبع قوانين على الاطلاق . فمثلا اعتقد أرسطو أنه قد اكتشف أحد قوانين الطبيعة عندما قال أن « الاجسام الثقيلة تتسارع الى الأرض اسرع من الاجسام الخفيفة » . وفي الحقيقة أنه لم يكتشف أحد قوانين الفيزياء لأنه لا وجود لمثل هذا القانون على الاطلاق . أما القانون الطبيعي الذي ينطبق على هذا الموقف فقد اكتشفه جاليليو بعد قرون عديدة كما رأينا سابقا .

وحتى القانون الذي اكتشفه جاليليو لتسارع الاجسام ، كما هو معلوم الآن ، أبعد من أن يكون قانونا كاملا وعاما . فنحن جميعا نعلم أن الاجسام الموجودة في سفن الفضاء تتصرف بطريقة تختلف كثيرا عن اجسام جاليليو الساقطة ، فالأجسام في سفينة الفضاء لا تبدو لقائد السفينة كأجسام ساقطة على الاطلاق ولكنها تبدو له عديمة الوزن تماما . وبالطبع لم يكن جاليليو يملك الوسيلة لمعرفة ذلك ، وعليه فمن الطبيعي أن يكون القانون الذي اقترحه غير كامل . كذلك فان قياساته لم تكن دقيقة لدرجة كافية لبيان أن نفس الجسم يتسارع بدرجات مختلفة تحت تأثير الجاذبية الأرضية في اماكن مختلفة على الأرض .

هناك قاعدة عامة في العلم تنص على أن أيا من قوانين الطبيعة لا يمكن أن يكون معروفا تماما بكل ما تحمل الكلمة من معنى . ويبدل العلماء قصارى جهدهم في صياغة قوانين الطبيعة كما يعرفونها . ومع ذلك فان أى عالم لا يتجرأ على أن يقول أن هذا القانون من قوانين الطبيعة أو ذاك ، كما هو مفهوم الآن ، لن يكون عرضه للتعديل كلما زادت معرفتنا أكثر وأكثر بالكون. ولكن يمكننا التأكيد أن جميع قوانين الطبيعة التي سنعرضها ونستخدمها في هذا الكتاب تقريبا صحيحة في اساسياتها أو أن حدود صحتها معلومة ، ونحن نعلم ذلك لأن هذه القوانين قد تم تحقيقها عمليا بجميع الطرق الممكنة . ومع ذلك فان هناك دائما فرصة لأن يتبين في وقت ما أن أحد هذه القوانين ، كما هو مصاغ ومفهوم في الوقت الحاضر ، لا يتفق مع نتائج بعض التجارب العبقريّة الجديدة . عندئذ ستتغير صيغة القانون بما يتفق مع التجربة الجديدة ، وكذلك مع النتائج التي نعلمها فعلا في الوقت الحاضر . لذلك فعند صياغة القانون الفيزيائي يمكن اعتباره صحيحا في ضوء معرفتنا الحالية فقط .

وستلاحظ عندما تتقدم في دراستك لعلم الفيزياء أن من النادر جدا أن يتضح أن أحد الافكار المقبولة المتعلقة بالقانون الفيزيائي غير صحيحة . ومع ذلك فمن الشائع تماما أن تجد أن أحد الافكار المقبولة يجب تعميمها وتوسيعها وتعديلها كلما توسعت معرفتنا بالكون وسنرى أن الشهرة العظيمة التي يتمتع بها العلماء الذين يقترحون أحد القوانين لا تؤكد دائما صحة هذا القانون . وكما سنرى في دراسة الضوء فإن عالما كبيرا مثل نيوتن كانت لديه اخطاء فاحشة جدا حول طريقة تصرف الاجسام الطبيعية . لهذا السبب فإن العالم الحكيم لايقبل القانون الفيزيائي بسبب عظمة وشهرة ناشره فقط ، فإن قانونا يكتشفه عالم شاب « مجهول » من خلال تجارب دقيقة قد يوثق به أكثر من الرأى الفلسفى لعالم « عظيم » .

وفي النهاية يجدر بنا أن نشير الى أن هناك تسلسلا هرميا للقوانين الفيزيائية . والهدف النهائى للعلماء هو اختصار عدد القوانين الفيزيائية اللازمة لوصف الكون الى الحد الأدنى . وبالطبع من الممكن استخدام قانون فيزيائي مختلف لكل موقف فيزيائي مختلف ، ولكن مثل هذا الموقف لايطاق لأن من المستحيل تذكر مثل هذا العدد الكبير من القوانين . ومع ذلك فإن كثيرا من هذه القوانين المنفصلة يمكن أن تتبع قانونا واحدا عاما يحتويها جميعها . وعلى سبيل المثال فإن القوانين المنفصلة

١ - يتسارع الجسم الذى وزنه 10 lb أثناء السقوط الحر على الأرض بمعدل قدره 32 Ft/s^2 .

٢ - يتسارع الجسم الذى وزنه 12 lb أثناء السقوط الحر على الأرض بمعدل قدره 32 ft/s^2 ، ... الخ .

قد ادبجت في قانون واحد هو قانون جاليليو الذى يمكن صياغته كمايلي :

تتسارع جميع الاجسام أثناء السقوط الحر على الأرض بمعدل قدره 32 ft/s^2 تقريبا .

سنرى فيما بعد أن صيغة جاليليو لهذا القانون الفيزيائي هي فقط جزء من قانون اكثر عمومية قد صاغه نيوتن بعد ذلك بعدد من السنين . وتفضل صيغة قانون الطبيعة. الذى يحتوى على مادة الكثير من القوانين الاصغر على أى صيغة للقوانين الاصغر المنفصلة .

٣ - ٢ قانون نيوتن الأول للحركة

كان اسحق نيوتن (١٦٤٢ - ١٧٢٧) واحدا من اهم الفيزيائيين في جميع العصور . فعندما كان في العشرينيات من عمره اخترع فرع علم الرياضيات المعروف

الآن بحساب التفاضل والتكامل واكتشف قانون الجاذبية ووجد أن الضوء الأبيض هو مجموعة مؤتلفة من الألوان ، وسناقش بعضا من هذه الموضوعات في فصول لاحقة. وفي هذا الفصل سنناقش القوانين الثلاثة الخاصة بالحركة والتي اكتشفها نيوتن . ونشرها لأول مرة في عام ١٦٨٧ في خلاصة وافية ممتازة لاكتشافاته العلمية تحت عنوان « الاساسيات الرياضية للفلسفة الطبيعية »*.

يمكن صياغة قانون نيوتن الأول للحركة ، مترجما عن اللاتينية ، كمايلي :

يستمر كل جسم في حالته من السكون أو الحركة المنتظمة في خط مستقيم ما لم يجبر على تغيير هذه الحالة بواسطة القوى المؤثرة عليه .

ويبدو هذا الجزء معقولا ومتفقاً مع خبرتنا اليومية ، فنحن نعلم جيدا أن الاجسام الساكنة تستمر في حالة السكون حتى تتسبب قوة خارجية ما في حركته . كلنا يدرك هذه الحقيقة . ولكننا قد نصاب بالرعب كما يحدث أحيانا عندما يدعى شخص ما أنه قد رأى جسما يتحرك بدون قوة ظاهرة تسبب هذه الحركة . ويتقبل الفيزيائيون ، كذلك المنطقيون من الناس ، هذا الجزء من القانون كبديهية مسلم بها . يمكننا صياغة هذا الجزء كمايلي :

يستمر الجسم الساكن في حالة السكون ما لم تؤثر عليه قوة محصلة تختلف عن الصفر .

قانون نيوتن
الأول

أما الجزء الثاني من القانون فانه اكثر خبثا ، وهو كمايلي :

يستمر الجسم المتحرك في حركته في خط مستقيم بسرعة ثابتة ما لم تؤثر عليه قوة محصلة تختلف عن الصفر .

يبدو أن الخبرة العامة تناقض هذا ، فنحن نعلم أن أى شيء لا يستمر في الحركة بدون تغيير الى الابد . فاذا دحرجت كرة على الأرض فانها سرعان ماتتوقف . كذلك فان الجسم المعدنى الذى ينزلق على منضدة ملساء يتباطأ تدريجيا ليتوقف في نهاية الأمر . وهناك حالات مشابهة كثيرة أخرى .

ومع ذلك فان كل من الامثلة المذكورة ليس اختبارا صحيحا لقانون نيوتن فهناك قوة تؤثر على كل من هذه الاجسام تحاول وقف حركته الافقية وهى قوة الاحتكاك .

* «Principia mathematica philosophiae naturalis»

ونحن جميعا نعلم أنه كلما زادت الاحتياطات التى نتخذها للتخلص من هذه القوة كلما قلت سرعة وصول الجسم الى حالة السكون . وقد عمم نيوتن هذه الملاحظة على الحالة التى تختفى فيها قوى الاحتكاك واستنتج أنه اذا كانت هذه الحالة ممكنة فان الجسم المتحرك لن يتوقف أبدا . وبالرغم من أنه لم يمكن حتى الآن الوصول الى مثال واحد للحركة بسرعة ثابتة فان خبرتنا تؤدى بنا الى الاعتقاد بأن حدس نيوتن المصاغ كقانون طبيعى صحيح .

وهنا من الضرورى أن نذكر أن الجسم المتحرك بدون تأثير أية قوة محصلة عليه يقال عنه عادة بأنه فى حال توازن . وقد يبدو للمبتدئين أن هذا استخدام غير صحيح للكلمة . ومع هذا فاذا عرفنا الجسم بأنه فى حالة توازن اذا كان مجموع جميع القوى الموجهة المؤثرة عليه يساوى صفرا فان الاستخدام السابق للكلمة سيكون صحيحا . وربما قبلت انت هذه الحقيقة بطريقة مختلفة فالموضوع اساسا موضوع تعريفات . ولكن من المفضل أن تقبل التعريف الذى أعطاه الفيزيائيون لمفهوم التوازن (على الاقل عندما تتكلم مع الفيزيائيين) حتى وان كنت تشعر فى قرارة نفسك أن هذا التعريف ليس هو التعريف « الطبيعى » .

٣ - ٣ قانون نيوتن الثالث للحركة

نظرا للتعقيد الكبير لقانون نيوتن الثانى فاننا سوف نناقشه بعد القانون الثالث . ينص القانون الثالث ، كما صاغه نيوتن ، على الآتى :

قانون نيوتن
الثالث

لكل فعل دائما رد فعل مساويا فى المقدار ومضاد له فى الاتجاه ، أو أن الافعال المتبادلة بين جسمين كل على الآخر متساوية دائما فى المقدار ومتضادة فى الاتجاه

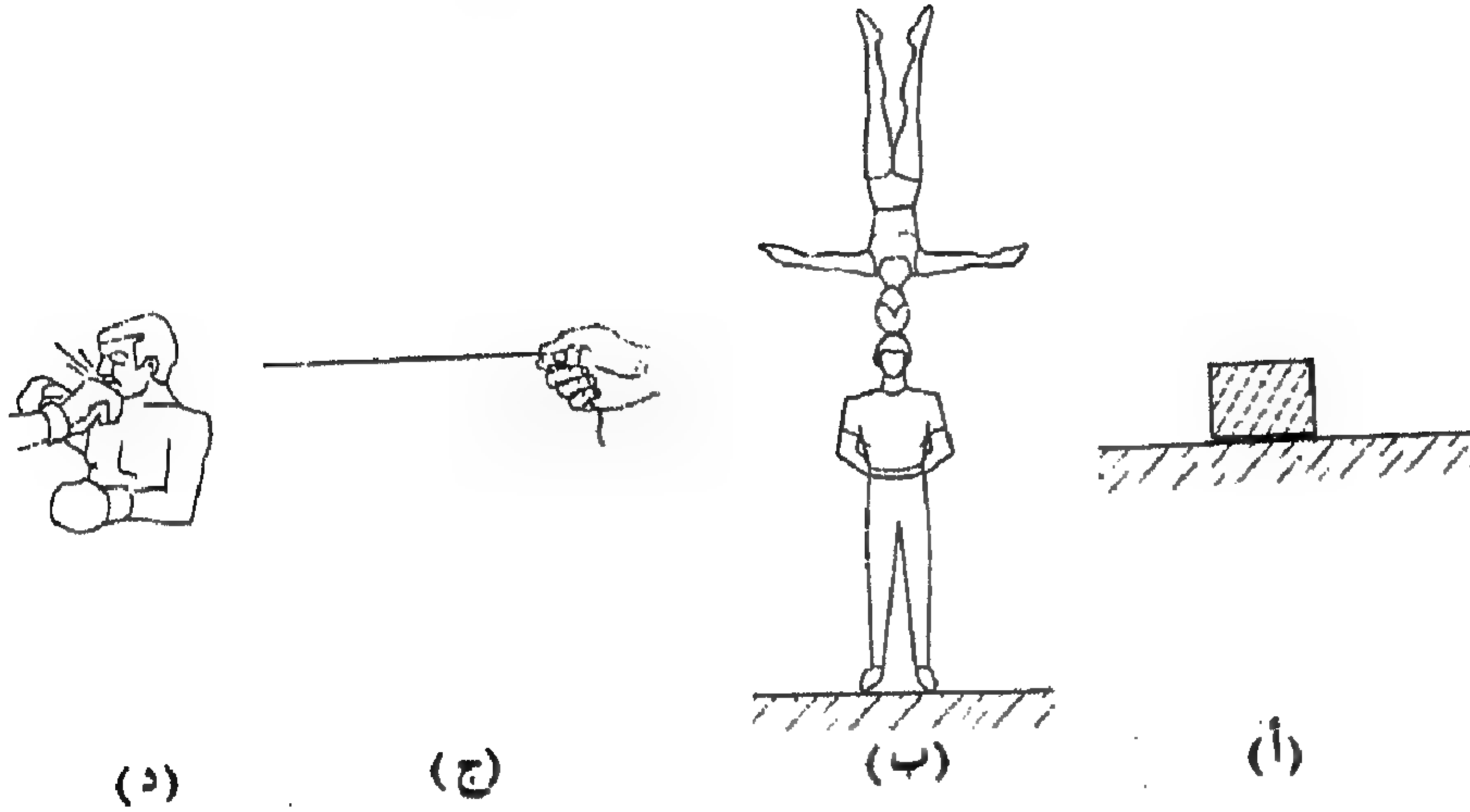
يمكننا اعادة صياغة هذا القانون بدلالة جسمين والقوى التى يؤثر بها كل منهما على الآخر . يمكننا عندئذ أن نقول مايلى :

اذا أثر جسم بقوة ما على جسم ثان فان الجسم الثانى يؤثر على الأول بقوة مساوية لها فى المقدار ومتضادة فى الاتجاه . وتسمى احدى هاتين القوتين بقوة الفعل وتسمى الاخرى بقوة رد الفعل .

* يمكنك أن تجد هذه الفقرة ، وكذلك كتابات كثير من العلماء العظماء الآخرين من « الكتاب المصدر فى الفيزياء » . تأليف و . ف . ماجى ، مطبعة جامعة هارفارد ، كيمبريدج ، ماساتشوستس ، ١٩٦٣ .
(«Source Book in Physics» by W.F. Magie, Harvard University Press, Cambridge, Mass, 1963) وأظن أنك سوف تستمتع بقراءة هذا الكتاب الممتاز .

يوضح الشكل ٣ - ١ بعض الامثلة بمعادون الثالث ويوضح الجدول التالى قوة الفعل وقوة رد الفعل فى كل حالة :

المثال	القوة الأولى	القوة الثانية
الجزء (أ)	يدفع القالب المنضدة الى أسفل	تدفع المنضدة القالب الى أعلى
الجزء (ب)	تدفع رأس المرأة الرجل الى أسفل	تدفع رأس الرجل المرأة الى أعلى
الجزء (ج)	تجذب اليد الحبل الى اليمين	تجذب الحبل اليد الى اليسار
الجزء (د)	تؤثر قبضة اليد بقوة على الفك	يؤثر الفك بقوة على قبضة اليد



شكل (٣ - ١)
لاحظ أن قوى الفعل ورد
الفعل تؤثران على جسمين
مختلفين .

من الضرورى أن تلاحظ أن قانون نيوتن الثالث يعالج جسمين متميزين .
ويؤثر الجسم الأول (A) على الثانى (B) بقوة الفعل بينما يؤثر الجسم الثانى (B)
على الأول (A) برد فعل معاكس وسوف نستخدم هذا القانون من وقت لآخر
لايجاد مقدار واتجاه القوة المؤثرة على جسم ما بمعلومية القوة التى تؤثر على جسم
آخر .

٣ - ٤ قانون نيوتن الثانى للحركة

يعتبر القانونان الأول والثالث صيغتان بسيطتان جدا للسلوك المألوف لنا جميعا وهما
يبدوان معقولين تماما حتى للمبتدئين . ومع ذلك فأننا سوف نرى أن القانون الثانى
ليس على هذه الدرجة من الوضوح وهذا صحيح لسببين : (١) القانون الثانى هو
صيغة رياضية مضبوطة للعلاقات بين كميات فيزيائية مختلفة تمام الاختلاف . (٢)
تطلب الصيغة المضبوطة لهذا القانون التعرف على مفهوم الكتلة ، وبالرغم من أن
الكتلة ليست معقدة حقيقة بذاتها فإنها أحيانا لاتتميز بوضوح كشيء مختلف عن
وزن الجسم يمكن كتابة هذا القانون بالطريقة الآتية :

إذا أثرت قوة محصلة تختلف عن الصفر على جسم ما فإن هذه القوة قانون نيوتن
تسبب تسارع الجسم في اتجاه القوة ، ويتناسب مقدار التسارع تناسب
طرديا مع مقدار القوة المحصلة وعكسيا مع كمية المادة الموجودة
في الجسم .

من السهل توضيح هذا القانون كفيما . إذا أراد شخص أن يدفع طفلا في عربة
الاطفال فمن الواضح لكل شخص أنه كلما زادت قوة دفع العربة كلما زاد
تسارعها . وكذلك فإن الحقيقة الكمية بأن تسارع جسم معين يتناسب تناسباً طردياً
مع القوة قد اثبتت مرات عديدة بالتجارب ومن أمثلتها تلك التجربة الموضحة في
شكل (٣ - ٢) . بناء على ذلك يمكننا كتابة العلاقة التالية :

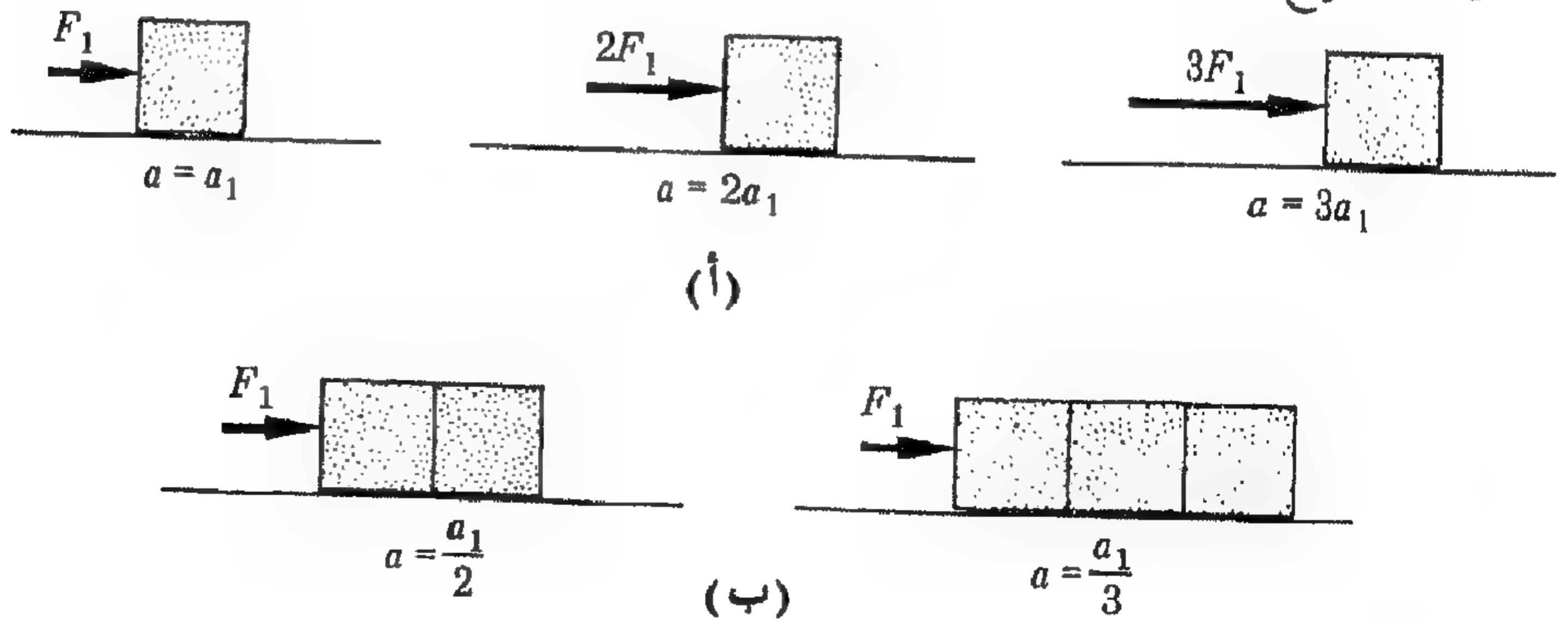
$$a \propto F$$

حيث تقرأ $a \propto$ هكذا « تتناسب مع »

ولكن القوة اللازمة لتسارع الجسم تعتمد أيضا على امتلاء الجسم . ولكل جسم
خاصية مميزة تسمى القصور الذاتي . فجميع الأجسام تميل إلى الاستمرار في حالة
السكون ما لم تؤثر عليها قوة غير متزنة ، بالإضافة إلى ذلك تميل الأجسام المتحركة إلى
الاستمرار في الحركة . لذلك يقال أن للجسم قصورا ذاتيا ويرتبط القصور الذاتي
للجسم بامتلائه . وعلى سبيل المثال يختار مدرب كرة القدم الأمريكية اللاعبين
المتملئين جدا للوقوف على الخط لأنه ليس من السهل دفع هؤلاء اللاعبين من
موضعهم ، أي أن المدرب يعلم أن القصور الذاتي للأجسام المتملئة أكبر من القصور
الذاتي للأجسام الأقل امتلاء . وعليه فإن من الصعب تحريك الأجسام المتملئة إذا
كانت ساكنة أصلا ، كذلك فإن من الصعب وقفها إذا كانت في حالة حركة من
قبل . من هذا يتضح أن خاصية الامتلاء أو القصور الذاتي يجب أن تتدخل بطريقة
ما في تحديد التسارع الذي تسببه قوة معينة . ولكي نرى كيف يدخل هذا العامل في
تحديد التسارع يمكننا إجراء تجربة عملية مثل تلك الموضحة في شكل ٣ - ٢ ب .

شكل (٣ - ٢)

عند إجراء هذه التجربة يجب
استخدام مسار هوائي أو
جهاز مشابه آخر لتقليل
الاحتكاك بحيث يصبح
مهملا : (أ) تتناسب F
طرديا مع a ، (ب) تتناسب
 a تناسباً عكسياً مع الكتلة .



نرى من هذه التجربة أن التسارع الذي تسببه قوة معينة يتناسب عكسياً مع
امتلاء الجسم الذي يتسارع . فإذا ضعف امتلاء الجسم مرتين فإن التسارع يقل إلى
النصف ، وإذا ضعف الامتلاء ثلاث مرات فإن التسارع يقل إلى ثلث قيمته
الأصلية . وعليه يمكننا كتابة العلاقة الآتية :

$$a \propto \frac{1}{m}$$

تعريف حيث m مقياس لامتلاء الجسم ، وسوف تسمى m كتلة الجسم . وتعتبر الكتلة خاصية ذاتية للجسم وهي مقياس للقوة غير المتزنة اللازمة لتسارع الجسم . كذلك فإنها تعتبر مقياسا للقصور الذاتي .

لقد وجدنا الآن ان $a \propto F$ عندما تكون m ثابتة ، ولكن $a \propto 1/m$ عندما تكون F ثابتة . يمكن توحيد هذين التناسبين في تناسب واحد :

$$a \propto \frac{F}{m}$$

لاحظ أن هذه العلاقة تقول أن $a \propto F$ عند تكون m ثابتة . بالمثل فإنها تقول أن $a \propto 1/m$ عندما تكون F ثابتة . وهكذا يمكننا القول أن هذه العلاقة تمثل النتائج العلمية المبينة في شكل ٣ - ٢ تمثيلا صحيحا .

يمكن تمثيل التناسب بمعادلة باستخدام ثابت التناسب . يمكننا اذن كتابة العلاقة الآتية :

التناسب . يمكننا اذن كتابة العلاقة الآتية :

$$a = \frac{(\text{const})(F)}{m}$$

ولتبسيط هذه المعادلة اتفق العلماء منذ زمن بعيد على قياس F و m بطريقة تمكنهم من جعل الثابت مساويا للوحدة . وهذا الشرط (وسنرى نتائجه فيما بعد) ، يمكننا أن نكتب :

$$F = ma \quad \text{أو} \quad a = \frac{F}{m} \quad (١ - ٣)$$

صيغة
رياضية
قانون نيوتن
الثاني

وهذه هي الصيغة لقانون نيوتن الثاني . وعند كتابة هذه الصيغة يلاحظ أن F هي القوة المحصلة المؤثرة على جسم كتلته m تذكر أيضا أن m مقياس للقصور الذاتي للجسم . وتقيس درجة صعوبة تحريك الجسم اذا كان ساكنا أو وقفة اذا كان متحركا قبل ذلك . كذلك يجب ملاحظة أن اتجاه التسارع a هو نفس اتجاه القوة F .

وعند هذه النقطة من المحتمل أن تستطيع ربط كتلة الجسم بوزنه . وبالطبع فان هناك علاقة بين الكميتين لأن الأجسام الممتلئة ثقيلة . وبالرغم من أن هناك علاقة بين الكتلة والوزن فإنهما ليسا متساويين .

ومن المهم جدا أن تعرف العلاقة بين الكتلة والوزن . لنحاول الآن ، اكتشاف هذه العلاقة .

لنرجع الى التجربة الموضحة في شكل ٣ - ٣ وهو يمثل جسما يسقط سقوطا ذاتيا تحت تأثير جذب الأرض له . ونحن نعلم بالطبع أن تسارعه هو تسارع الجاذبية g . بالإضافة الى ذلك فإننا نعلم ماهى القوة غير المتزنة التى تؤثر على الجسم ، وهى جذب الجاذبية الأرضية للجسم وقد سميناها فيما سبق بوزن الجسم . وهكذا فإن القوة المحصلة المؤثرة على الجسم الموضح في شكل ٣ - ٣ هى وزن الجسم W وهذه القوة غير المتزنة تكسب الجسم تسارعا قيمته g . لنعوض الآن عن هذه القيم في المعادلة (٣ - ١) . سنجد عندئذ أن :

$$W = mg \quad \text{أو} \quad m = \frac{W}{g} \quad (٣ - ٢) \quad \begin{array}{l} \text{العلاقة بين} \\ \text{الكتلة والوزن} \end{array}$$

وهذه المعادلة في غاية الاهمية وهى توضح العلاقة بين كتلة الجسم

ووزنه .

يستنتج من ذلك أن الكتلة ثابت اكثر تميزا للجسم من وزنه . وقد بينت التجارب الدقيقة أن قيمة g تختلف من مكان الى آخر على سطح الأرض وقد وضعنا ذلك في الفصل السابق . ومع ذلك فقد وجد أن وزن الجسم يختلف أيضا من مكان الى آخر على سطح الأرض . وقد وجد دائما أن التغير في قيمتى W و g يتم بحيث تظل النسبة W/g ثابتة دائما . وعليه ، فبالرغم من أن وزن الجسم يتغير ، ويعتمد ذلك على مكان قياسه ، فإن قانون نيوتن الثانى يبين أن كتلة الجسم ثابتة في كل مكان* .

هذه الحقيقة في الواقع هى احدى الحقائق المؤكدة في عصرنا الحديث . فعندما يظهر جسم عديم الوزن لرائد فضاء موجود في تابع أرضى فإننا نعلم أن كتلته m مازالت كما هى على سطح الأرض دون أى تغيير . وحيث أن هذا صحيح فإننا نرى من المعادلة (٣ - ١) أن القوة اللازمة لتسارع جسم ما في التابع الأرضى هى نفس القوة اللازمة لتسارعه على الأرض . وبدرجة عالية من الدقة يمكن اعتبار أن كتلة الجسم ثابتة (باستثناء حالات خاصة سنذكرها فيما بعد) وأن التسارع الذى تسببه قوة معينة للجسم لايعتمد على ما اذا كان هذا الجسم على الأرض أو في أى مكان آخر في الكون .

وحيث أن الكتلة تتناسب تناسبا طرديا مع وزن الجسم على الأرض فإن من المعتاد أن ننسب خصائص مميزة معينة للأجسام الى وزنها عندما نود الحديث بدقة عن



الوزن $W =$

شكل (٣ - ٣)
القوة غير المتزنة التى تؤثر على
الجسم هى وزنه W ، وتسبب
هذه القوة تسارعا مقداره g .

* وضع اينشتين سنة ١٩٠٥ لأول مرة أن هذه العبارة ليست صحيحة تماما وسنناقش هذا الموضوع بتفصيل أكثر فيما بعد .

كتلتها . فمثلا اذا أمكن وضع قاطرة سكة حديد في قمر صناعى يدور حول الأرض فانه سيكون من الصعب أن نسب تسارع هذه القاطرة بنفس الدرجة كما لو كانت موجودة على الأرض تماما ، لأن المعادلة (٣ - ١) مازالت صحيحة في هذه الحالة . ومع ذلك فان القاطرة ستبدو عديمة الوزن بالنسبة لشخص موجود في داخل القمر الصناعى ، لذلك فليس صحيحا أن نقول أنه من السهل تسارع الاجسام الخفيفة ، ويعتمد ذلك على مكان قياس الوزن وعلى الشخص الذى يقوم بعملية الوزن* .

من هذا نجد أن خاصية القاطرة الثابتة على الأرض وفي المدار ايضا هي كتلتها m . من الواضح اذن أن كتلة الجسم هي مقياس أفضل كثيرا للقوى اللازمة لتسارعه اكثر من كون الوزن مقياسا لذلك. وتسمى تلك الخاصية التى تتطلب أن تؤثر قوة معينة على الجسم لكي تسبب تسارعه بالقصور الذاتى للجسم . وتعتبر كتلة الجسم مقياسا مباشرا لقصوره الذاتى .

تعريف

٣ - ٥ الوحدات القياسية للقياس

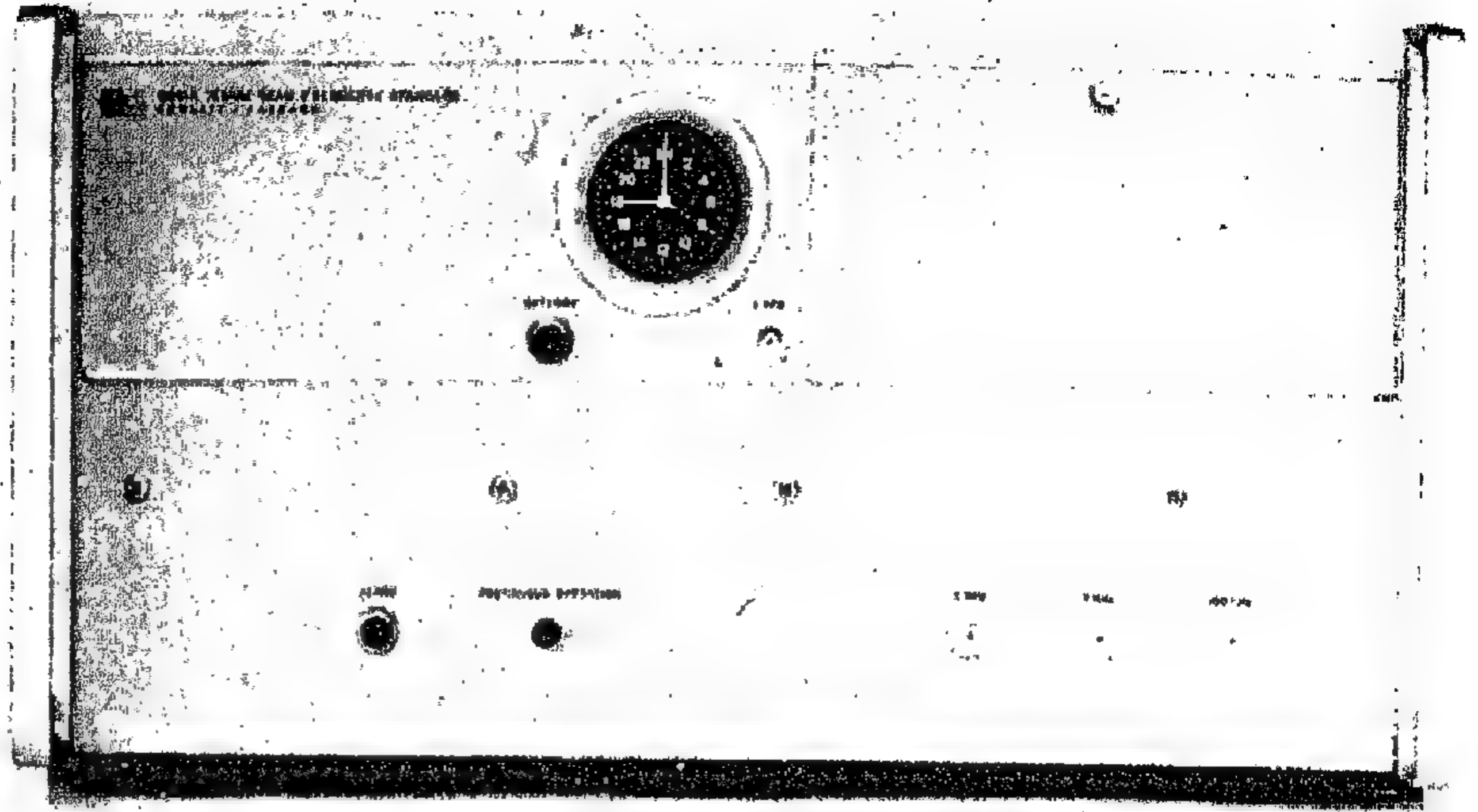
استخدمنا في الاجزاء السابقة من هذا الكتاب وحدات قياس مألوفة لنا جميعا . ومع ذلك فمن الضرورى الآن أن نعرف بدقة الكميات الأساسية التى استخدمناها في اجزاء سابقة .

وحدات الطول . بناء على اتفاق عالمى كانت الوحدة المستخدمة لقياس الطول لسنوات كثيرة هي المسافة بين علامتين محفورتين على قضيب مصنوع من سبيكة من البلاتين والايريديوم محفوظا في المكتب الدولى للأوزان والمقاييس قرب باريس* . وقد عرف المتر بأنه المسافة بين هاتين العلامتين عندما تكون درجة الحرارة 0°C . والسنتيمتر هو جزء من مائة من المتر الامام (العيارى) وكاجراء احتياطى قورن طول هذا القضيب بالطول الموجى للون معين من الوان الطيف الضوئى بحيث اذا حدث أن دمر هذا القضيب لأى سبب من الاسباب فإن الطول الموجى لهذا الضوء يمكن أن يستخدم كمقياس عيارى بديل . وبالتالى فقد اعيد تعريف المتر الامام بدلالة هذا الطول الموجى للضوء ، وعليه فان القضيب المحفوظ في باريس هو فقط مقياس عيارى ثانوى وسنناقش هذه النقطة بتفصيل اكثر عندما نبدأ دراسة الضوء .

وتعرف الوحدات البريطانية للطول (القدم والبوصة والياردة) بدلالة المتر الامام . وبالتعريف فان بوصة واحدة تساوى 0.0254 m وتساوى الياردة 0.9144 m

* لم نحاول أن نشرح لماذا تبدو القاطرة عديمة الوزن بالنسبة الى شخص موجود في القمر الصناعى ، وستوضح هذه الاسباب عندما نكمل دراسة الحركة الدائرية في الفصل الثامن .

* International Bureau of Weights and Measures.



شكل (٣ - ٤)
ساعة سيزيوم قياسية من
الانتاج التجارى .
هيلوت - باكارد

وحدات الزمن . عرفت وحدة الزمن الاساسية لسنوات طويلة بدلالة متوسط طول اليوم . ولكن حركة الأرض تتغير قليلا بمرور القرون ، لذلك اتفق على تعريف هذه الوحدة بدلالة متوسط طول اليوم في عام ١٩٠٠ بالتحديد . ولكى يتاح لنا مقياس اكثر سهولة للزمن اعيد تعريف وحدة الزمن في عام ١٩٦٧ ، ولتعريف وحدة الزمن الأساسية استخدم تردد اهتزاز ذرات السيزيوم نظرا للسهولة النسبية لقياسه . وتعرف الثانية الآن بأنها تساوى تماما 9,192,631,770 ضعفا قدر زمن اهتزازه واحدة من هذه الاهتزازات . ويمثل الشكل ٣ - ٤ احد النماذج التجارية لساعة ذرية قياسية . وبالطبع فان الدقيقة 60 s ، وتعرف الساعة واليوم والسنة ... الخ كالمعتاد .

وحدات الكتلة . تعرف وحدة الكتلة وتسمى الكيلوجرام بأنها كتلة اسطوانة معينة مصنوعة من سبيكة البلاتين والايريديوم محفوظة بالقرب من باريس ، ويوضح الشكل ٣ - ٥ نسخة من هذه الكتلة الامامية (القياسية) . وحيث ان الوزن يتناسب طرديا مع الكتلة ، من الممكن اذن أن تقارن الاجسام الاخرى بالكتلة الامامية عن طريق الوزن . وهكذا فان الجسم الذى وزنه مرتين قدر وزن الكتلة الامامية تكون كتلة 2 Kg (ومن الطبيعى أن عمليات الوزن يجب أن تتم فى نفس الظروف) . ويعرف الجرام (g) بأنه $\frac{1}{1000}$ Kg .

٣ - ٦ الوحدات المشتقة

يسمى نظام الوحدات المبني على اساس المتر والكيلوجرام والثانية بالنظام mks واسمه الرسمى SI (اشارة الى System International) ، وقد اتفق على استخدام هذا النظام فى المنشورات العلمية . بالاضافة الى ذلك فان النظام المترى المستخدم فى التجارة والصناعة فى بلاد كثيرة يرتبط ارتباطا وثيقا بالنظام SI . وتعتبر الولايات المتحدة آخر اهم البلاد فى استخدام النظام المترى وقد يعزى هذا الى ان وحدات النظام البريطانى مثل القدم - والباوند ... الخ ستهجر قريبا .



من اهم مميزات النظام المتري والنظام SI أن الوحدات في كل من هذين النظامين ترتبط بقوى الرقم 10 ، وعند تسمية هذه الوحدات تستخدم البادئات الآتية (انظر الملحق ٢ اذا لم تكن الرموز 10^n و 10^{-n} مألوفة لك) :

المعامل	الرمز	البادئة
10^{18}	E	اكسا
10^{15}	P	بيتا
10^{12}	T	تيرا
10^9	G	جيجا
10^6	M	ميغا
10^3	k	كيلو
10^{-1}	d	ديسي
10^{-2}	c	سنتي
10^{-3}	m	ملي
10^{-6}	μ	ميكرو
10^{-9}	n	نانو
10^{-12}	p	بيكو
10^{-15}	f	فيمتو
10^{-18}	a	أتو

مثلا 1 Kg يساوى 10^3 g ، بينما 1 pm (picometer) يساوى 10^{-12} m . وكما ترى فان اضافة البادئة الى اى وحدة تعطينا وحدة جديدة .

ولكننا نحتاج ايضا الى وحدات اخرى بالاضافة الى وحدات الطول والكتلة والزمن ، ومن اهم هذه الوحدات وحدة القوة . تعرف الوحدات الاساسية للقوة بدلالة قانون نيوتن الثانى $F = ma$ ، ويمكن استخدام هذا التعريف بسهولة فى النظام SI ، وسنسمى وحدة القوة فى هذا النظام بالنيوتن (N) .

تعريف . النيوتن هو تلك القوة غير المتزنة التى تعطى جسما كتلته 1 Kg تسارعا قدره 1 m/s^2 .

وبكتابة هذا التعريف بدلالة قانون نيوتن الثانى $F = ma$ نجد أن :

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2)$$

وعليه فان النيوتن يكافئ $1 \text{ Kg} \cdot \text{m/s}^2$.

لازال بعض الناس يستخدمون السنتيمتر والجرام والثانية كوحدات أساسية . وتسمى وحدة القوة فى هذا النظام ، النظام cgs بالداين (dyn) ، وهو ايضا يعرف بدلالة القانون $F = ma$.

الداين هو تلك القوة غير المتزنة التى تعطى جسما كتلته 1 g تسارعا قدره 1 cm/s^2 .

وكما نرى من القانون $F = ma$

$$1 \text{ dyn} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2$$

كذلك يمكن بتحويل $1 \text{ Kg} \cdot \text{m/s}^2$ الى جرام . سنتيمتر في الثانية المربعة اثبات أن :

$$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyn}$$

وحدة القوة في النظام البريطاني هي الباوند (lb) وتعرف أيضا بدلالة النيوتن . من التعريف نجد أن :

$$1 \text{ lb} = 4.45 \text{ N}$$

وفي الوقت الحالى يقل استخدام الباوند بسرعة الا في الولايات المتحدة .

من الضروري الآن مناقشة الوحدة البريطانية للكتلة (التى تقابل الكيلوجرام في النظام SI) ، وتعرف هذه الوحدة بحيث تظل العلاقة $F = ma$ هي العلاقة الاساسية . تعرف وحدة القوة في النظام البريطاني باسم سلج . ونختار بحيث

اذا أثرت قوة غير متزنة مقدارها 1 lb على جسم كتلته 1 slug فانها تسبب له تسارعا مقداره 1 ft/s^2 .

يمكنك ايضا استخدام التعريف المكافئ التالى :

$$1 \text{ slug} = 14.6 \text{ kg}$$

وبالطبع ، حيث أن $W = mg$ فان 1 slug يزن 32.2 lb في مكان تسارع الجاذبية فيه $g = 32.2 \text{ ft/s}^2$.

وقد يتساءل البعض لماذا لم نهتم سابقا بالوحدة البريطانية للكتلة وهي سلج ، ولكن سبب ذلك في غاية البساطة . فالذين يستخدمون النظام البريطاني للوحدات يكتبون قانون نيوتن عادة على الصورة :

$$F = \frac{W}{g} a$$

حيث استبدلت m بقيمتها من المعادلة (٣ - ٢) ، أى بالمقدار W/g . وحيث أن التغير الصغير في وزن الجسم من مكان الى مكان على الأرض ليس هاما في التطبيقات الهندسية فان المهندس يستخدم وزن الجسم كما هو مقاس ، حتى بالرغم من أن هذا الوزن لا يكون عادة هو الوزن المضبوط ، أى وزن الجسم المقاس في نفس المكان على الأرض الذى قيس فيه تسارع الجاذبية g . وبهذه الطريقة يمكنهم تجنب استخدام مصطلح الكتلة ووحدتها وهي سلج .

لتلخيص هذه المناقشة عن الوحدات المشتقة يمكننا ان نلاحظ أن هناك ثلاث مجموعات اساسية للوحدات . (هناك ايضا أنظمة أخرى للوحدات ولكنها تستخدم نادرا ، ولذلك فلن نناقشها في هذا الكتاب) ويمكن تلخيص هذه الأنظمة بالاستعانة بقانون نيوتن الثانى كمايلي :

$$F = m \times a$$

نظام الوحدات	وحدة القوة	وحدة الكتلة	وحدة التسارع
SI	نيوتن	كيلوجرام	m/s^2
cgs	داين	جرام	cm/s^2
النظام البريطاني	باوند	سليج	ft/s^2

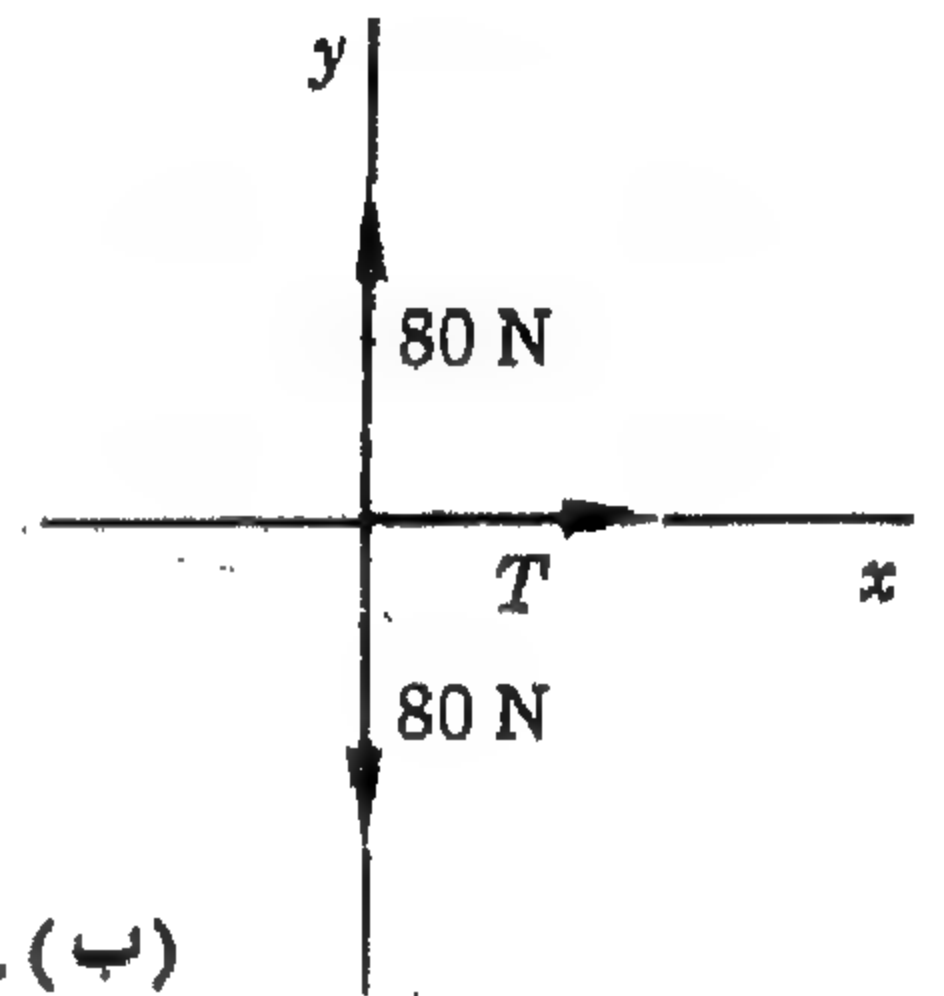
من الضروري عند استخدام القانون $F = ma$ أن نراعى دائما استخدام نظام واحد للوحدات في وقت واحد . فمثلا اذا كانت القوة مقدرة بالباوند فان الكتلة يجب أن تكون مقدرة بالسليج ويكون التسارع مقدرا بالقدم في الثانية في الثانية وليس بالميل في الثانية في الثانية ولا يجب استخدام وحدات مختلطة في هذه العلاقة .



(أ)

وقبل أن نترك هذا الجزء من المستحسن أن نوضح الحقائق التالية، ويراعى أننا قد استخدمنا القيم التقريبية التسارع الجاذبية g :

- ١ - وزن الكتلة 1-kg على الأرض 9.8 N .
- ٢ - وزن الكتلة 1-g على الأرض 980 dyn .
- ٣ - وزن الكتلة 1-slug على الأرض 32.2 lb .
- ٤ - وزن الكتلة 1-kg على الأرض 2.21 lb .
- ٥ - وزن الحرف المقطوع من هذه الصفحة حوالى 1 dyn .
- ٦ - 1 N يساوى 10^5 dyn بالضبط .



(ب)

شكل (٣ - ٦)

رسم بيان الجسم الحر الذى يوضح القوى المؤثرة على العربة هو الجزء (ب) من الرسم .

٣ - ٧ استخدام قانون نيوتن الثانى

مثال توضيحي ٣ - ١ : سنرى في هذا الجزء كيف يستخدم قانون نيوتن الثانى في المواقف العملية . لندرس الموقف الموضح في شكل ٣ - ٦ . ماهو الشد في الحبل الذى يجذب العربة في شكل ٣ - ٦ إذا كان التسارع المطلوب للعربة هو 0.5 m/s^2 ؟ وزن العربة 80 N .

طريقة الحل : لحل هذه المسألة يجب أولا أن نرسم رسم بيان الجسم الحر الذى يوضح القوى المؤثرة على العربة ، وقد تم هذا في شكل ٣ - ٦ : لاحظ أن هناك ثلاث قوى مؤثرة على العربة وهى جذب الجاذبية الأرضية الى أسفل ودفع الأرضية الى أعلى والشد في الحبل الى اليمين . وحيث أن العربة لا يمكن أن تسقط خلال الأرضية أو ترتفع الى أعلى في الهواء فان مجموع القوى الرأسية لابد أن يساوى صفرا ، أى أنها تتلاشى . وعليه فان القوة غير المتزنة (أو المحصلة) المؤثرة على العربة هى T . بالإضافة الى ذلك فان التسارع سيكون في اتجاه T .

لكتابة قانون نيوتن الثاني ، $F = ma$ ، لابد من معرفة كتلة العربة . ولكننا نعلم من المعطيات أن وزن العربة 80 N وعليه فإن كتلة العربة يمكن حسابها من العلاقة $m = W/g$ إذن :

$$m = \frac{80 \text{ N}}{9.8 \text{ m/s}^2} = 8.2 \text{ kg}$$

باستخدام هذه القيمة سنجد من العلاقة :

$$F = ma$$

أن :

$$T = (8.2 \text{ kg})(0.50 \text{ m/s}^2) = 4.1 \text{ N}$$

سندرس الآن بعض الأمثلة الأخرى لكي نوضح النقاط المختلفة المتعلقة باستخدام قانون نيوتن الثاني .

مثال توضيحي ٣ - ٢ : يجذب طفل عربة وزنها 64 lb بقوة قدرها 10.0 lb كما هو موضح في شكل ٣ - ٧ . (١) بأي معدل تتسارع العربة ؟ (٢) بأي قوة تدفع الأرض هذه العربة الى أعلى ؟

طريقة الحل : كما في المثال السابق نرسم رسم بيان الجسم الحر كما في الجزء (ب) من الشكل . P هو دفع الأرض على العربة الى أعلى . لاحظ الآن أن لجذب الحبل مركبتين في الاتجاهين الأفقي والرأسي . بعد تحليل هذه القوة الى مركبتين في الاتجاهين x و y فإن رسم بيان القوى سيكون كما في الجزء (ج) . وحيث أن العربة مستقرة على الأرض فإن مجموع القوى الرأسية يجب أن يكون صفراً . وهكذا :

$$P + 6.0 - 64 = 0$$

$$P = 58 \text{ lb}$$

أو

وهي اجابة الجزء ٢ من المسألة .

سيكون اتجاه تسارع العربة هو نفس اتجاه القوة غير المتزنة F وهو الاتجاه الأفقي .

بناء على ذلك :

$$F = ma$$

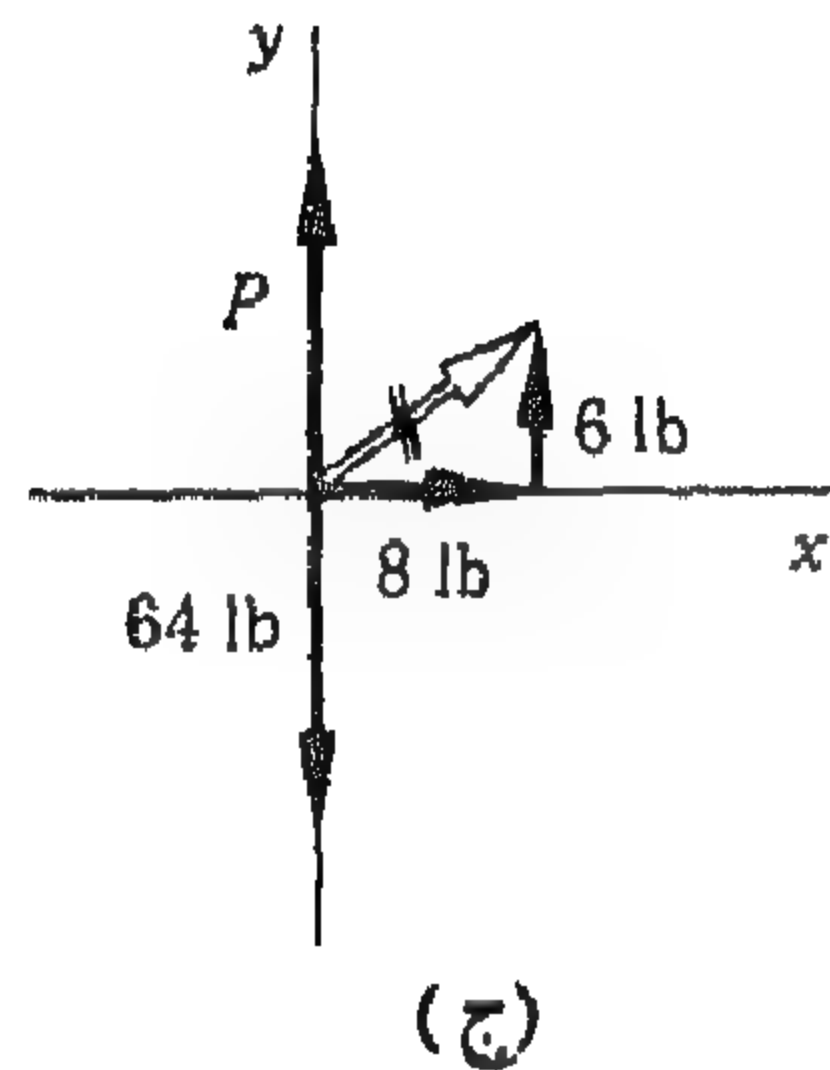
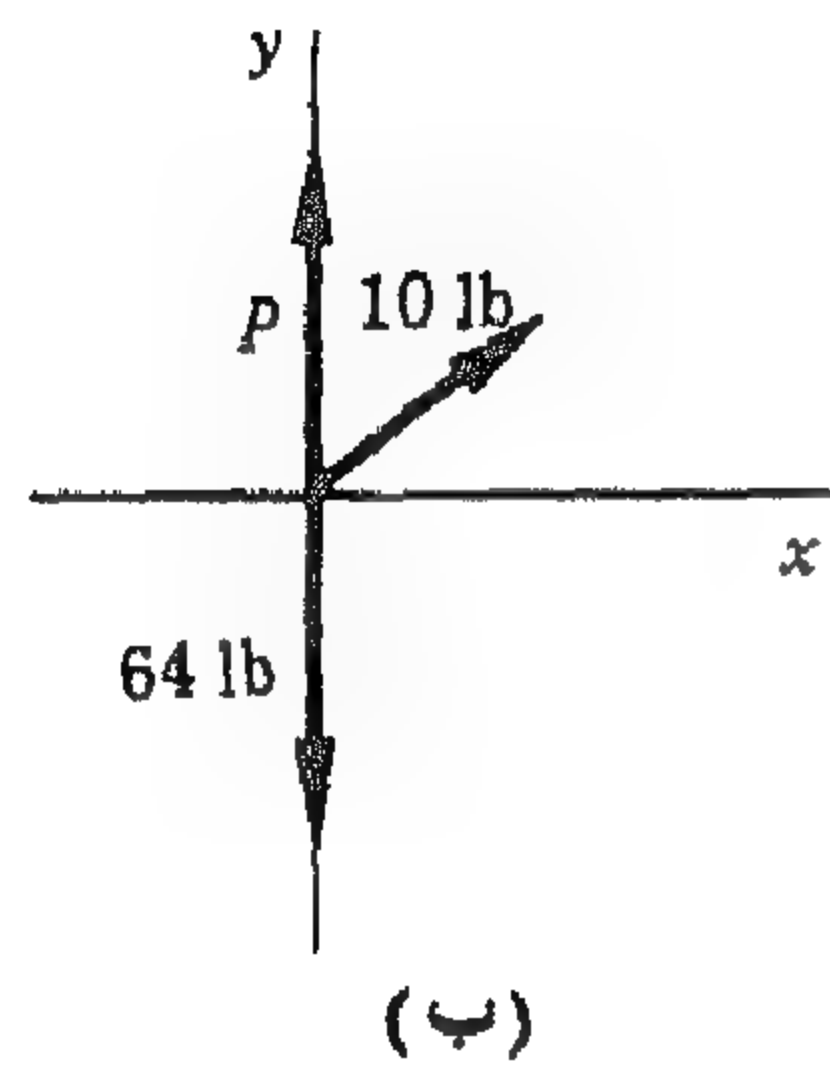
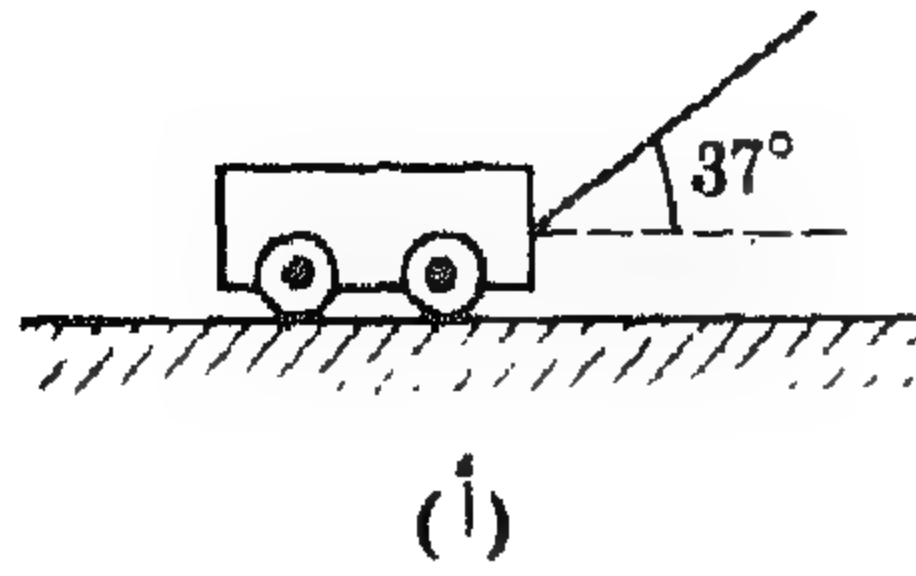
$$8.0 \text{ lb} = \left(\frac{64 \text{ lb}}{32 \text{ ft/s}^2} \right) (a)$$

أو

$$a \approx 4.0 \text{ ft/s}^2$$

لاحظ أننا قد استبدلنا m بالمقدار W/g .

مثال توضيحي ٣ - ٣ : علق جسم وزنه 64 lb في حبل متدل من سقف مصعد (شكل ٣ - ٨) ماهو الشد في الحبل اذا كان متسارعا بمعدل (أ) 12 ft/s^2 الى أعلى ، (ب) 12 ft/s^2 الى أسفل ، (ج) 32 ft/s^2 الى أسفل ؟



شكل (٣ - ٧)

يساهم جذب الحبل للعربة P في الاتزان مع وزن العربة وكذلك اعطاء العربة تسارعا الى اليمين .

طريقة الحل : يوضح الشكل ٣ - ٨ أ رسم بيان الجسم الحر حيث T هو الشد في الحبل أى جذب الحبل للجسم الى أعلى . فى الامثلة السابقة لم يكن هناك غموض يذكر فى الاتجاهات . ولكن هذه المسألة معقدة قليلا ، لذلك فيجب علينا الآن اتباع خطة منهجية للحل ومن المعقول أن نختار اتجاها معيناً كاتجاه موجب واعتبار القوى والتسارعات فى هذا الاتجاه موجبا ، أما القوى والتسارعات المتجهة فى عكس هذا الاتجاه فتعتبر سالبة .

أ - باعتبار الاتجاه الرأسى الى أعلى اتجاها موجبا ، نجد أن :

$$F = ma$$

$$T - 64 = \left(\frac{64}{32}\right)(12)$$

اثبت باستعمال الوحدات المناسبة فى هذه المعادلات أن :

$$T = 88 \text{ lb}$$

(ب) باعتبار الاتجاه الرأسى الى أعلى اتجاها موجبا ، نجد أن :

$$T - 64 \text{ lb} = \left(\frac{64 \text{ lb}}{32 \text{ ft/s}^2}\right)(-12 \text{ ft/s}^2)$$

$$T = 40 \text{ lb}$$

لاحظ الإشارة السالبة للتسارع ، وهى ضرورية هنا لأن التسارع متجه إلى أسفل وأما قد اخذنا الاتجاه إلى أعلى كاتجاه موجب .

(ج) باعتبار الاتجاه الرأسى الى أسفل اتجاها موجبا ، نجد أن :

$$64 - T = \left(\frac{64}{32}\right)(32)$$

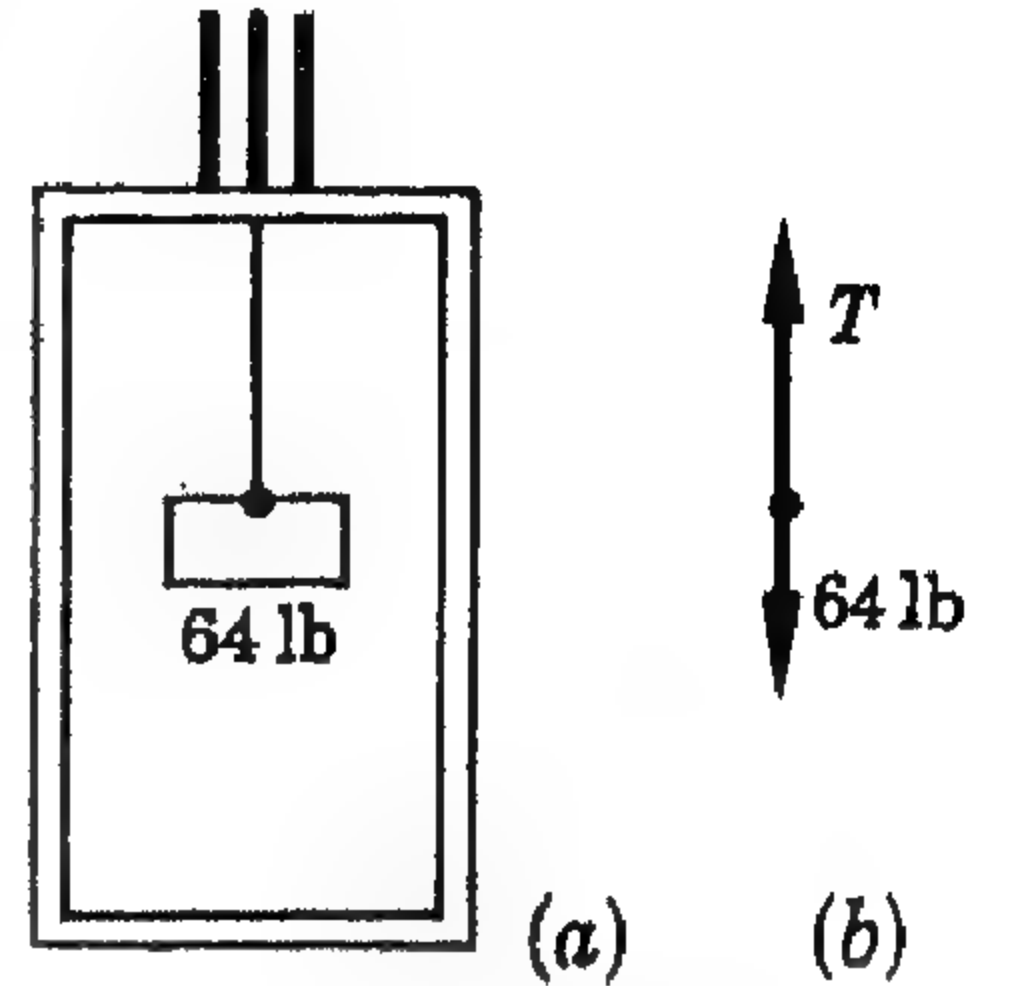
$$T = 0$$

لاحظ أن اختيار الاتجاه الى أعلى أو الى أسفل كاتجاه موجب مسألة شخصية بحيث إذ يمكن الحصول على نفس النتيجة بأى من الطريقتين . لتتحقق الآن من أن نتائجنا معقولة .

فى الجزء أ كان تسارع الثقل الى أعلى ، وعليه فان القوة غير المتزنة متجهة الى أعلى وكانت الجاذبية الأرضية تجذب الجسم الى أسفل بقوة قدرها 64 lb بينما كان الحبل يشد الجسم الى أسفل بقوة قدرها 88 lb . بناء على ذلك كانت القوة غير المتزنة 24 lb الى أعلى ، كما يجب أن تكون .

فى الجزء ب يتحتم أن تكون القوة غير المتزنة متجهة الى أسفل لان التسارع يتجه إلى أسفل . يتضح اذن من اجابتنا أن جذب الجاذبية ومقداره 24 lb إلى أسفل أقوى من جذب الحبل الى أعلى .

قد تبدو اجابة الجزء ج غريبة قليلا الى أن ندرك أن التسارع المطلوب هو مجرد g ، ويمكن الحصول على هذا التسارع فقط اثناء السقوط الحر ، وعليه فأن الشد فى الحبل لابد أن يكون صفرا .



شكل (٣ - ٨)

عندما يتسارع المصعد الى أعلى يكون T اكبر من 64 lb ، فى أى حالة يظهر الجسم كما لو كان عديم الوزن ؟

يجدر بنا أن نلاحظ هنا أن الشخص الذى يحمل شيئا ما فى مصعد هابط كما فى الجزء جـ سيلاحظ أن الجسم المعنى عديم الوزن* . وكما رأينا فإن الجسم يسقط سقوطا حرا وعليه فإن الشد فى الحبل يساوى صفرا وليست هناك حاجة لاية قوة تحمله . واذا كان الجسم معلقا فى ميزان زنبركى أو موضوعا على ميزان فإن الميزان سيقرا صفرا . ومن الواضح أن الجسم يبدو كما لو كان عديم الوزن . مع الواضح اذن أن انعدام الوزن الظاهرى للأجسام الموجودة فى الاقمار الصناعية وسفن الفضاء التى تهبط فى الفضاء تحت تأثير الجاذبية يشبه تماما هذا المثال . وكما سنرى فى الفصل الثامن تكافئ جميع هذه الحالات مصعدا يسقط سقوطا حرا ، لذلك فإن الأجسام الساقطة سقوطا حرا (سفينة الفضاء وكل شىء داخلها) لابد أن تظهر عديمة الوزن لشخص يسقط أيضا سقوطا حرا .

مثال توضيحي ٣ - ٤ : كانت سيارة كتلتها 1500 kg تتحرك بسرعة قدرها 60 km/h (حوالى 37 mi/h) عندما ضغط السائق على الفرامل فتزحلق السيارة الى أن وصلت الى حالة السكون . فاذا كانت الاطارات المتزحلقه تتعرض لقوة احتكاك قدرها سبعة اعشار وزن السيارة ، فما هى المسافة التى تقطعها السيارة قبل الوقوف ؟

طريقة الحل : تمثل هذه المسألة اتحادا نموذجيا للمسألة $F = ma$ ومسألة حركة . يمكننا استخدام العلاقة $F = ma$ لايجاد a ، ثم يمكن استخدام معادلات الحركة الخمس لايجاد مسافة التوقف .

علمنا ان كتلة السيارة 1500 kg وعليه فان وزن السيارة هو :

$$\text{الوزن} = mg = (1500 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 14,700 \text{ N}$$

كذلك نعلم من المعطيات أن قوة الوقف هى :

$$(0.70)(\text{weight}) = 10,290 \text{ N}$$

وهذه هى القوة غير المتزنة المؤثرة على السيارة . بالتعويض عن هذه القوة فى العلاقة $F = ma$ واعتبارها سالبة لأنها فى عكس اتجاه الحركة سنجد أن :

$$-10,290 \text{ N} = (1500 \text{ kg})a$$

ومنه :

$$a = -6.9 \text{ m/s}^2$$

وهذا تقاصر لذلك فانه سالب .

تستطيع الآن حل مسألة السيارة المتزحلقه . المعطيات هنا هى :

* مع ذلك فان وزن الجسم ، أى جذب الأرض له ، ليس صفرا . وعليه فان $W = mg$ لاتعنى تغيرا فى الوزن .

$$v_0 = 60 \text{ km/h} = 16.7 \text{ m/s} \quad v_f = 0$$

$$a = -6.9 \text{ m/s}^2 \quad s = ?$$

ويمكننا استخدام العلاقة $v_f^2 - v_0^2 = 2as$ لنجد أن $s = 20.2 \text{ m}$.

من الضروري ملاحظة أن قوة الوقف التي استخدمناها قريبة من القيمة العظمى الممكنة . نستنتج من هذا اذن أن السيارة المتحركة بسرعة قدرها حوالى 60 km/h (37 mi/h) تحتاج مسافة قدرها حوالى 20 m لكي تقف . هل تستطيع أن تثبت أن مسافة الوقف تتناسب طرديا مع مربع السرعة الابتدائية للسيارة ؟

مثال توضيحي ٣ - ٥ : ربطت الكتلتان الموضحتان في شكل (٣ - ٩) في طرفي حبل عديم الوزن ثم علق الحبل على بكره لاحتكاكية عديمة الوزن . أوجد تسارع الكتلتين (يسمى هذا الجهاز آلة «اتوود») .

طريقة الحل . من الواضح أن الكتلة 10 kg سوف تسقط وأن الكتلة 5 kg سوف ترتفع . ولاتقوم البكرة للاحتكاكية بأى عمل سوى أنها تحمل الحبل . لنرمز الى الشد في الحبل بالرمز T ، ويلاحظ أنه ثابت في جميع اجزاء الحبل .

حل مثل هذه المسألة التي تحتوى على جسمين أو اكثر يجب كتابة المعادلة $F = ma$ لكل جسم على حدة . اولا يجب اختيار الاتجاه الموجب للحركة . نعلم في هذه الحالة أن البكرة ستدور في اتجاه دوران عقارب الساعة ، لذلك فمن المعقول أن نعتبر حركة الاجسام موجبة عندما تتحرك في هذا الاتجاه .

الخطوة الثانية هي رسم بيان الجسم الحر لكل من الكتلتين 10 kg و 5 kg كما هو موضح في الجزئين ب و ج من الشكل . لاحظ أن وزن الجسم الذى كتلته 10 kg هو $10(9.8) \text{ N}^*$ بتطبيق العلاقة $F = ma$ على كل من الجسمين نحصل على :

$$98 - T = 10a$$

$$T - 49 = 5a$$

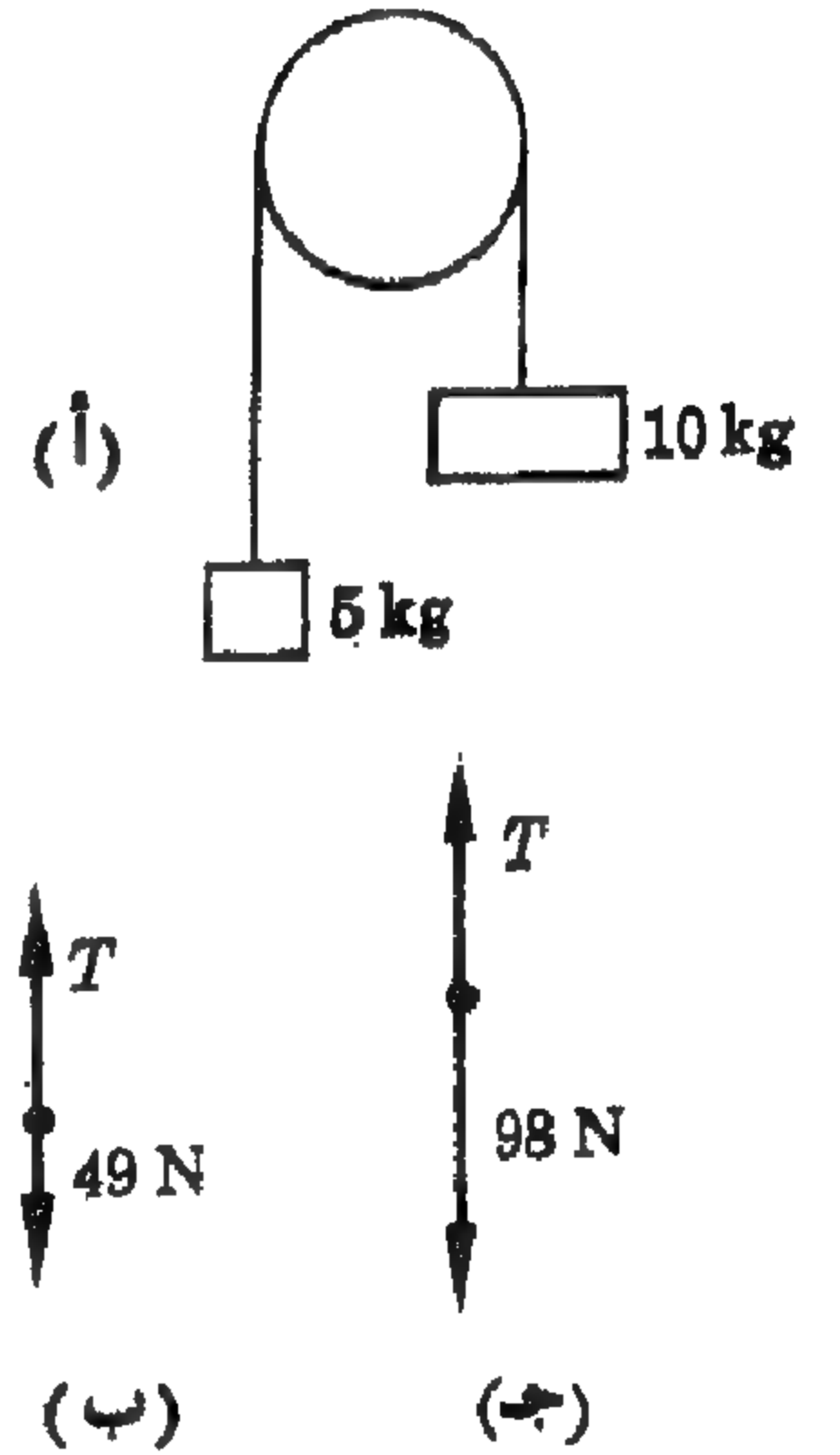
لاحظ أن القوتين المتجهتين في نفس اتجاه الحركة قد اعتبرنا موجبتين .

بجمع المعادلتين السابقتين نجد أن :

$$49 \text{ N} = (15 \text{ kg})(a)$$

$$a = 3.3 \text{ m/s}^2$$

حيث استخدمنا حقيقة أن النيوتن يساوى $1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ بالتعويض عن قيمة a في أى من المعادلتين نجد أن :



شكل (٣ - ٩)

حيث أن الكتلة 10 kg سوف تسقط عند دوران البكرة في اتجاه دوران عقارب الساعة فان الشد في الحبل يجب أن يكون أقل من وزن الجسم الذى كتلته 10 kg وأكبر في نفس الوقت من وزن الجسم الذى كتلته 5 kg .

$$W = mg = (10 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 98 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 98 \text{ N}$$

* لأن

$$T = 65 \text{ N}$$

للتحقق من هذه الاجابة يلاحظ أن الشد في الحبل اكبر من وزن الجسم الخفيف ولذلك فانه يرتفع بالاضافة الى ذلك يلاحظ أن الشد أصغر من وزن الجسم الثقيل ، لذلك فهو يسقط الى أسفل .

مثال توضيحي ٣ - ٦ : يمثل الشكل ٣ - ١٠ جسمين مربوطين في طرفي خيط بحيث يتعلق احد الجسمين عبر بكره لاحتكاكية بينما يستقر الآخر على منضدة . فاذا علمت أن قوة الاحتكاك التي تعوق حركة الجسم الموضوع على المنضدة تساوي 0.098 N ، اوجد تسارع الجسمين .

طريقة الحل : عندما تعطى مثل هذه المسألة الى الطلاب فأنهم يقررون أن الجسمين لن يتحركا لأن الجسم الذي كتلته 200 g اخف كثيرا من الجسم الذي كتلته 400 g ، ولكن هذا غير صحيح . ويفسر ذلك بأن وزن الجسم الذي كتلته 400 g متجهها الى أسفل ، وهذه القوة تتزن مع دفع المنضدة الى أعلى . أما القوة الوحيدة التي تجذب الجسم الى الخلف فهي قوة الاحتكاك كما هو واضح من رسم بيان الجسم الحر الموضح في الجزء ب من الشكل .

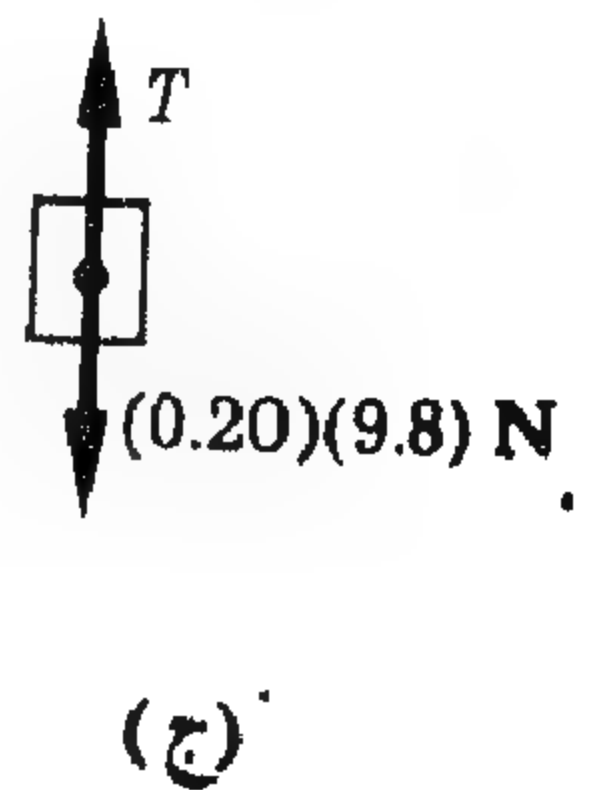
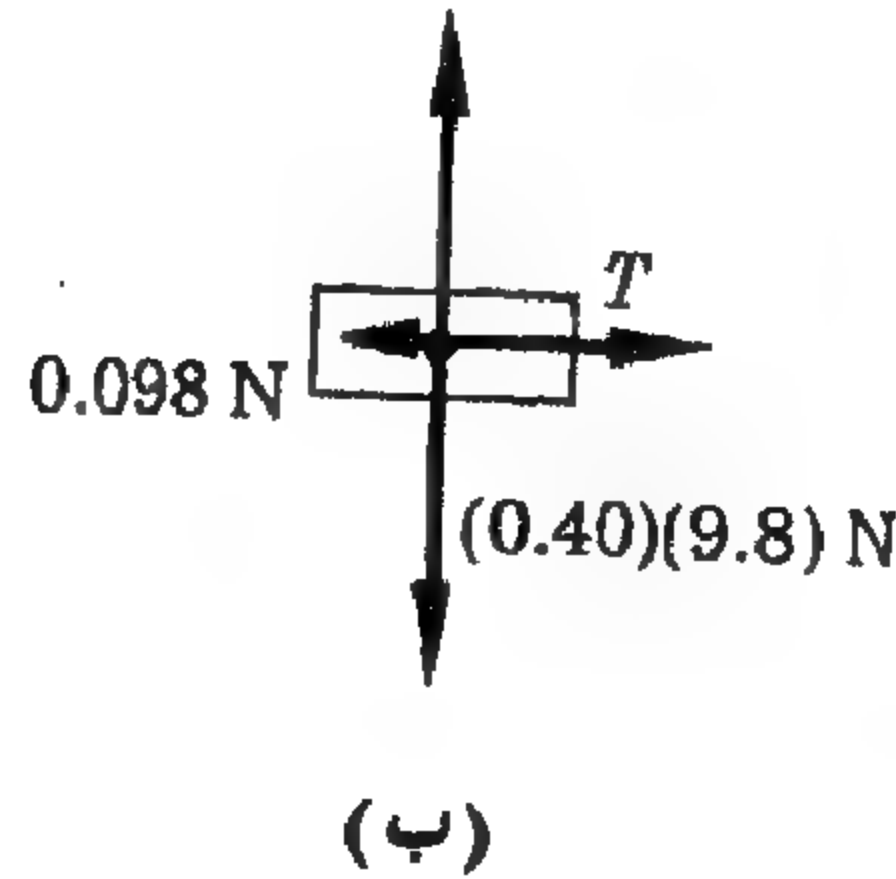
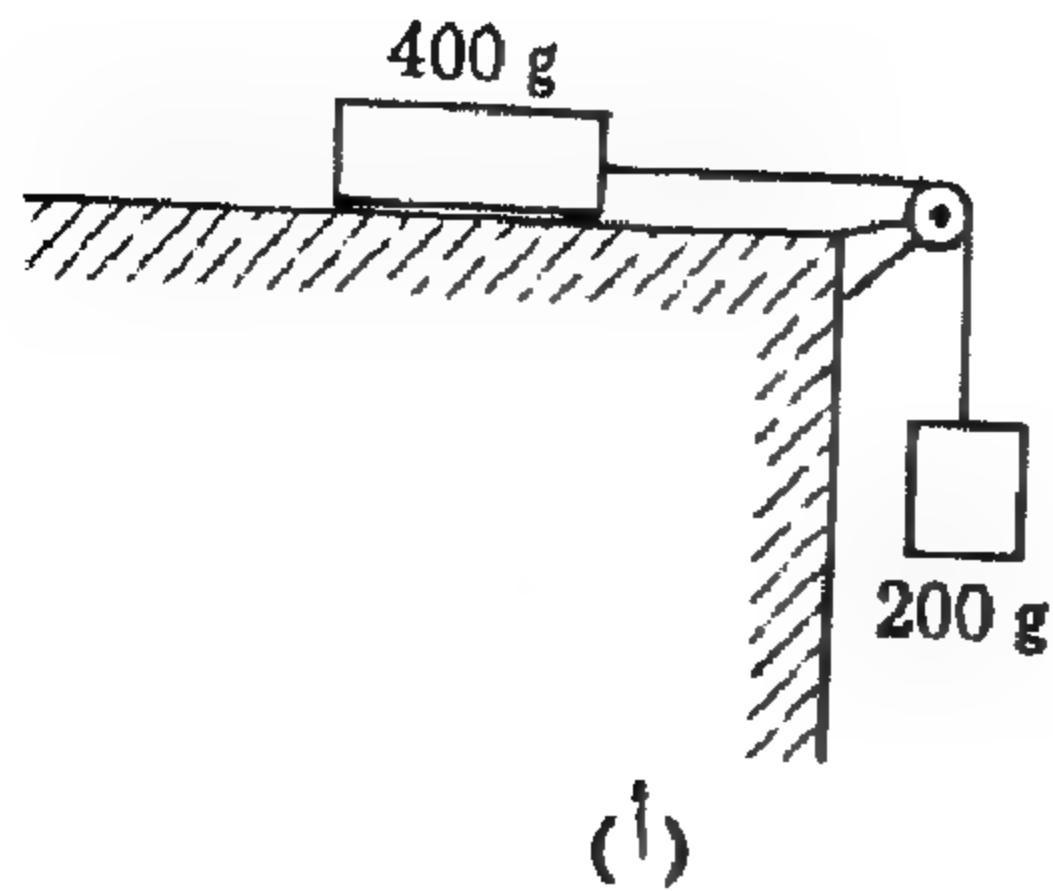
بعزل كل جسم بالترتيب وكتابة العلاقة $F = ma$ لكل منهما سنجد بعد تحويل الوحدات الى النظام SI أن (انظر شكل ٣ - ١٠ ب ، ج) :

$$T - 0.098 = 0.40a$$

$$(0.20)(9.8) - T = 0.20a$$

و حيث تقدر القوى بالنيوتن والكتل بالكيلوجرام . عند كتابة هاتين المعادلتين اعتبرنا أن اتجاه الحركة التي تحدث عند سقوط الجسم الذي كتلته 200 g الى اسفل هو الاتجاه الموجب. لاحظ أيضا أن $W = mg$ لذلك فان وزن الجسم الذي كتلته 0.20 g هو $(0.20)(9.8) \text{ N}$.

بجمع هاتين المعادلتين وحل المعادلة الناتجة بالنسبة الى a سنحصل على :



$$a = 3.1 \text{ m/s}^2$$

باستخدام حقيقة أن النيوتن هو $1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ يمكنك اثبات أن وحدات a هي فعلاً كما هو مذكور .

بالتعويض في أى من المعادلتين سنجد أن :

$$T = 1.34 \text{ N}$$

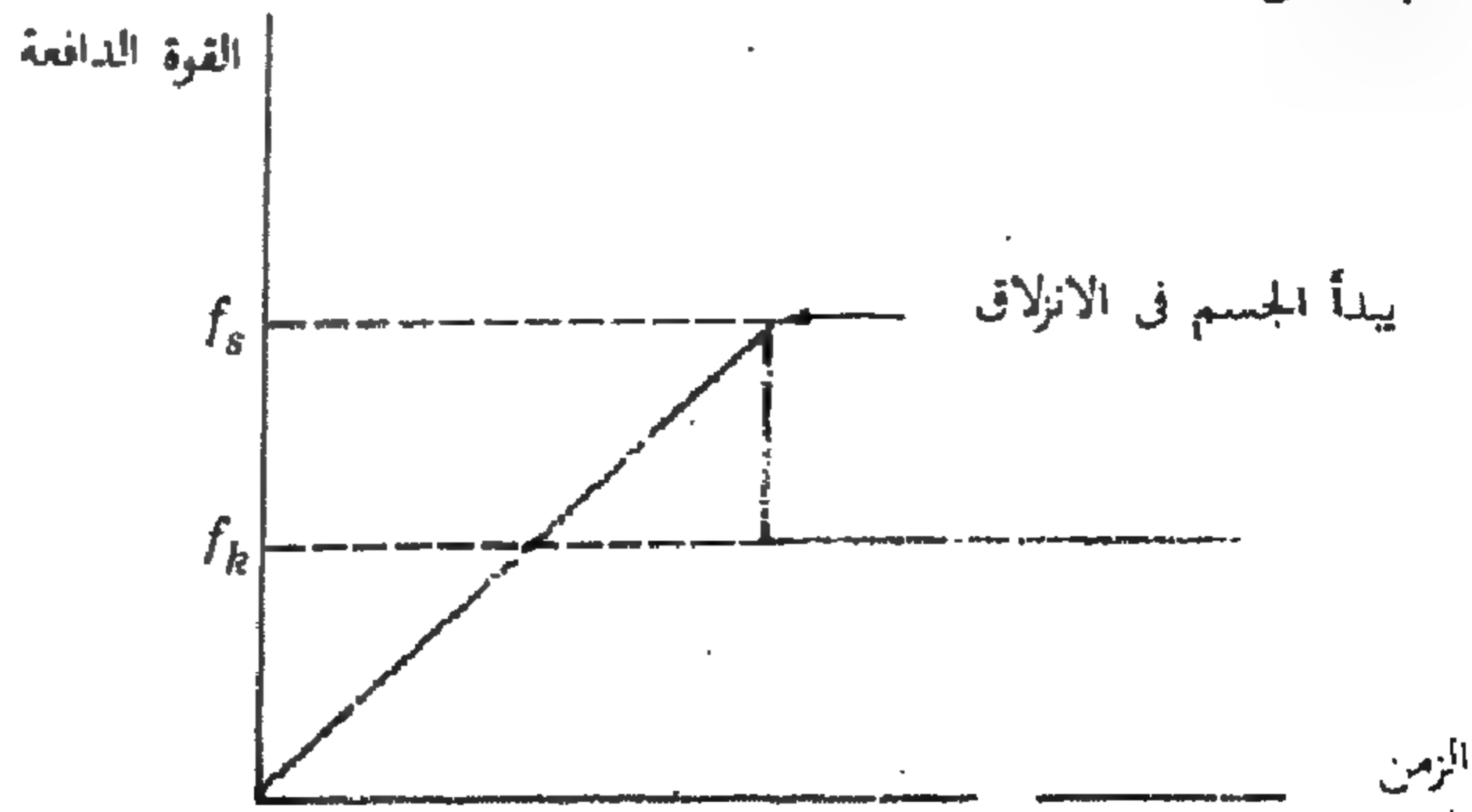
٣ - ٨ قوى الاحتكاك

لندرس الآن طبيعة قوة الاحتكاك التي تعوق الجسم عند انزلاقه على سطح ما . يمكنك أن تتعلم شيئاً قليلاً عن قوى الاحتكاك بأن تدفع كتابك عبر المنضدة كما هو مبين في شكل ٣ - ١١ . لنفرض أنك تزيد قوتك الدافعة ببطء كما هو مبين في شكل ٣ - ١١ ب . في البداية لن يتحرك الجسم ، ولكن عندما تصل القوة الدافعة إلى قيمة حرجة معينة سيبدأ الكتاب في الحركة فجأة . نرى من ذلك أن هناك نهاية عظمى لقوة الاحتكاك التي تقاوم بداية الانزلاق ، وهي تساوى في المقدار القوة الدافعة الحرجة التي تسبب انزلاق الجسم . وسنرمز لقوة الاحتكاك هذه والتي تقاوم بداية الانزلاق بالرمز f_s . (يرمز الدليل السفلى s إلى كلمة استاتيكي «Static» أو كلمة ساكن «Stationary» لأن الجسم ساكن عند لحظة بداية الانزلاق) .

وإذا بدأ الجسم في الانزلاق فإن قوة اصغر كثيراً من f_s ستكون كافية لاستمراره في الحركة ، وهذا يوضح لنا أن قوة الاحتكاك التي تقاوم حركة جسم متحرك أقل من f_s ، وسنرمز لهذه القوة بالرمز f_k . (يرمز الدليل السفلى k إلى كلمة حركي أو متحرك «Kinetic») يمكنك التحقق مما نقول بدفع كتاب على منضدة . جرب وسترى .

يمكن التعرف على الأسباب الرئيسية لهذا السلوك بالاستعانة بالشكل ٣ - ١٢ . وكما ترى فإن السطحين المتلامسين ليسا أملسين . لذلك فإن النقط الخشنة تتداخل في بعضها وتسبب مقاومة السطحين للانزلاق . ومع ذلك فإذا بدأ الانزلاق فلن يتوفر الوقت الكافي للسطحين لكي يتلاحما تماماً كل مع الآخر . كنتيجة لذلك فإن القوة اللازمة لحفظ الجسم في حالة الحركة أقل من القوة اللازمة لبدء حركته .

شكل (٣ - ١١)
تقل قوة الاحتكاك التي
تعاكس حركة الكتاب فجأة
عندما يبدأ الكتاب في
الانزلاق .

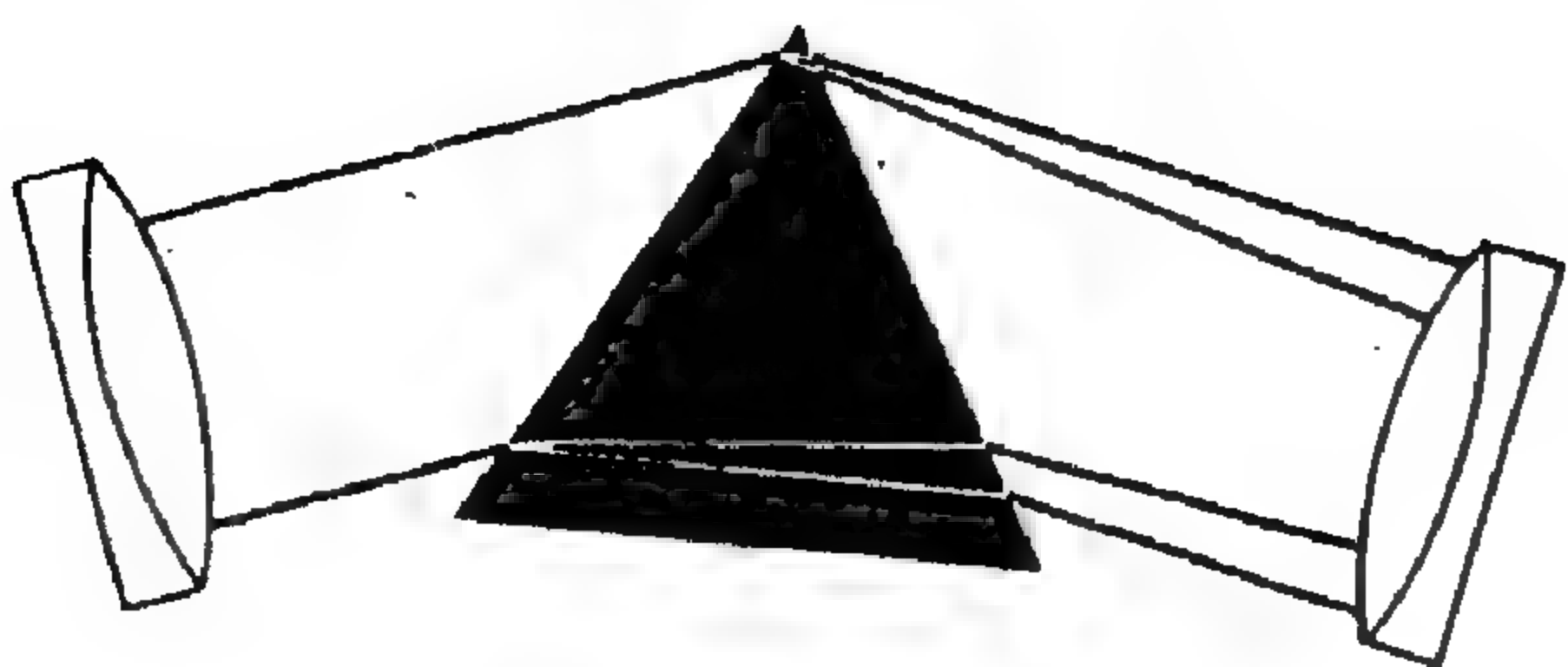


(أ)

(ب)

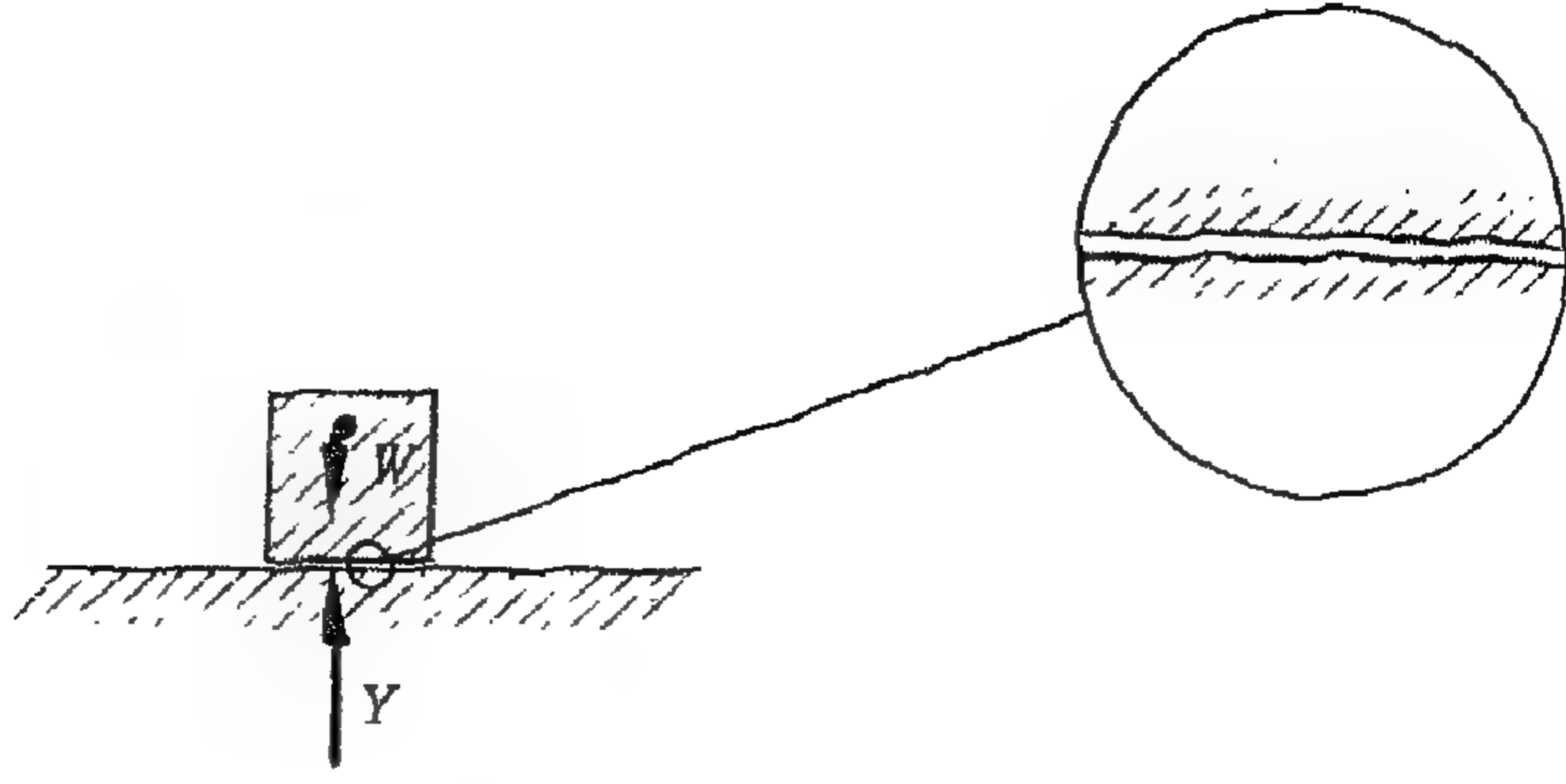


الأطياف الضوئية



شكل (٣ - ١٢)

تظهر الخشونة المحسوسة
للسطحين عند تكبيرهما
تكبيراً كبيراً ، وهذا يصعب
انزلاق أحد السطحين على
الآخر .



من المفيد في كثير من الظروف أن تكون قادراً على إيجاد مقدار قوة الاحتكاك التي تقاوم الحركة . لهذا الغرض يعرف عادة معامل الاحتكاك μ (باليونانية ميو) التي تبين التجربة أنه يربط قوة الاحتكاك f بالقوة العمودية Y . والقوة العمودية هي ببساطة تلك القوة العمودية التي يدفع بها السطح الحامل الجسم المنزلق عليه . يمثل الشكل ٣ - ١٣ بعض المواقف النموذجية وقيم Y في كل حالة ، وعليك دراسة كل منها والتأكد أن Y هي بالفعل كما هو مبين .

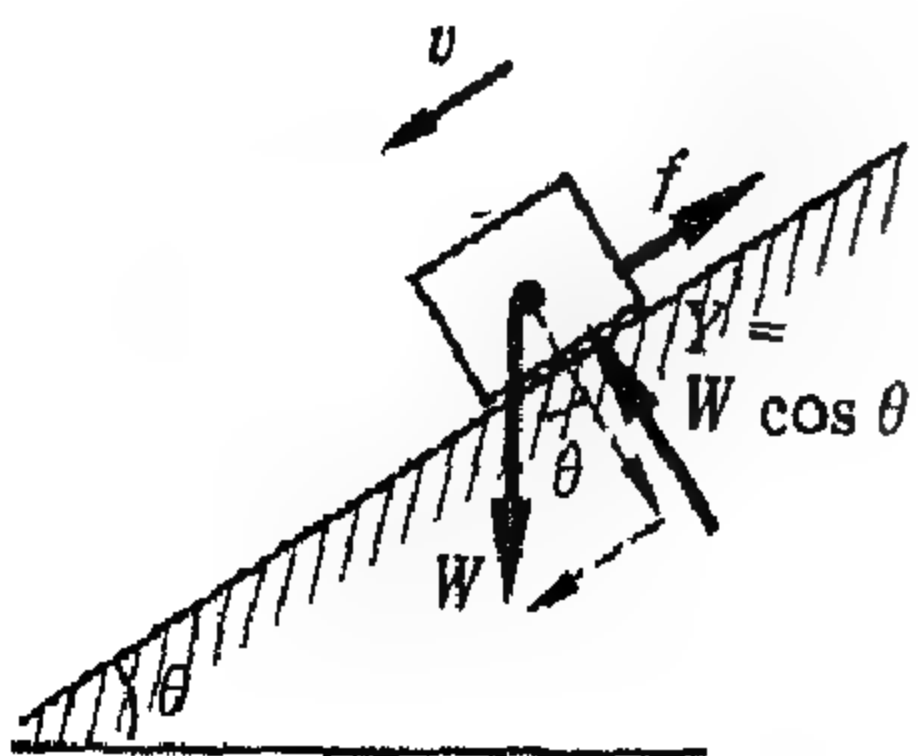
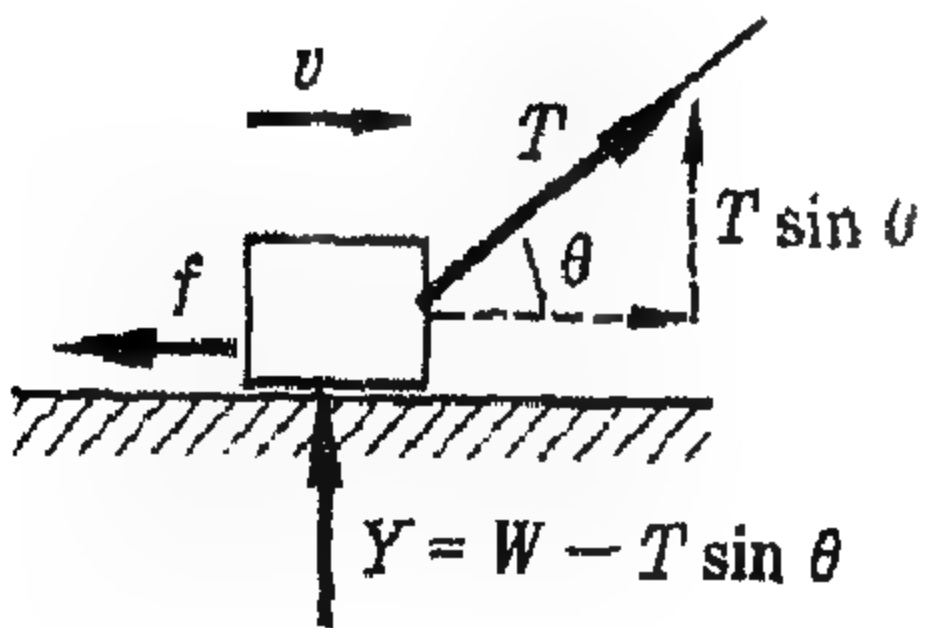
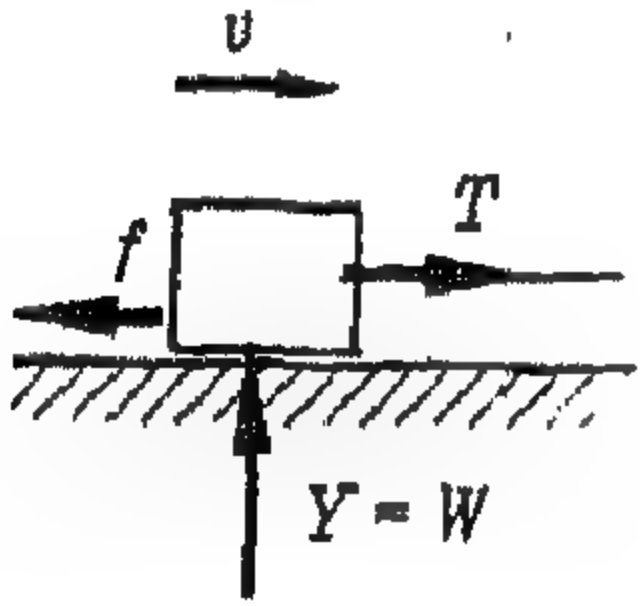
معامل
الاحتكاك

إذا قيسَت قوة الاحتكاك f التي تقاوم حركة جسم ينزلق على سطح ما يمكن إيجاد العلاقة التقريبية الآتية :

(٣ - ٣)

شكل (٣ - ١٣)

لاحظ أن القوة العمودية Y
لاتساوى بالضرورة وزن
الجسم .



وتستخدم هذه العلاقة كتعريف لمعامل الاحتكاك μ . ويمكن صياغة هذه المعادلة بالكلمات كمايلي : تتناسب قوة الاحتكاك طردياً مع القوة العمودية . وقد وجد أن معامل الاحتكاك μ يختلف كثيراً من سطح الى آخر ، ويبين الجدول ٣ - ١ بعض القيم النموذجية لهذا المعامل .

يلاحظ أن قيم معامل الاحتكاك المدرجة في الجدول ٣ - ١ تمثل معاملات الاحتكاك الحركية (أو الديناميكية) لأنها تنطبق فقط على الجسم الذي ينزلق بالفعل على السطح . من ناحية أخرى لاحظنا عند مناقشة الموقف الموضح في شكل ٣ - ١١ أن قوة الاحتكاك قبل بداية الانزلاق مباشرة اكبر قليلاً منها بعد بداية الانزلاق مباشرة ، لذلك فإن معامل الاحتكاك في هذه الحالة يسمى معامل الاحتكاك الاستاتيكي . وتعتمد جميع هذه المعاملات على الحالة الفعلية للسطح ، لذلك يجب استخدامها فقط كطريقة لتعيين القيمة التقريبية لقوة الاحتكاك .

معاملات الاحتكاك الحركية*

السطح ١	السطح ٢	μ
خشب	جليد	~ 0.06
لحام اصفر	فلج	$0.02-0.1$
معدن	معدن (مشحم)	~ 0.07
خشب بلوط	خشب بلوط	0.25
مطاط	خرشافة (مبللة)	$0.5-0.9$
مطاط	خرشافة (جافة)	$0.7-1.0$

مثال توضيحي ٣ - ٧ . عند دراسة إحدى الحوادث لاحظ ضابط الشرطة أن إحدى السيارات قد تركت آثار ترحلق على طريق مرصوف جاف ومستو وكان طول آثار الترحلق 7.0 m . احسب أقل حد لسرعة السيارة قبل بداية ترحلقها .

طريقة الحل . لنفرض أن السيارة قد تقاصرت بانتظام حتى السكون . لايجاد قيمة أكبر تقاصر ممكن للسيارة لنفرض (من جدول ٣ - ١) أن معامل الاحتكاك بين السيارة والطريق هو 0.90 .

وإذا كانت كتلة السيارة m فان وزنها سيكون mg وعليه فان القوة العمودية Y لابد أن تتزن مع وزن السيارة ، وعليه فإن $Y = mg$ من هذا نجد أن :

$$f = \mu Y$$

وعليه فان قوة الاحتكاك التي تسبب وقوف السيارة هي :

$$f = 0.90 mg$$

وهي القوة غير المتزنة المؤثرة على السيارة والتي تسبب تقاصرها . لايجاد التقاصر تطبق

$$F = ma \text{ العلاقة على السيارة مع العلم أن } F = \mu Y = f$$

اذن فان العلاقة :

$$F = ma$$

ستصبح :

$$-0.9 mg = ma$$

لاحظ أن كتلة السيارة تختزل من الطرفين لنحصل على $a = -0.90 g$ ، حيث g تسارع الجاذبية .

يمكننا الآن حل مسألة الحركة المتعلقة بترحلق السيارة . المعطيات (أو المعطيات الافتراضية) هي :

$$v_f = 0 \quad s = 7.0 \text{ m} \quad a = -0.90 g = -8.8 \text{ m/s}^2$$

* تقرأ هذه العلامة \sim هكذا « تقريبا »

والمطلوب إيجاد السرعة الابتدائية v_0 . لتحقيق ذلك نستخدم العلاقة $v_f^2 = v_0^2 + 2as$

اذن :

$$0 = v_0^2 - (17.6)(7.0) \text{ m}^2/\text{s}^2$$

ومنه نجد أن :

$$v_0 = 11.1 \text{ m/s}$$

وبجميع الاحتمالات ، كانت السيارة تتحرك بسرعة ابتدائية اكبر من هذه السرعة . لماذا يمكننا أن نستنتج ذلك ؟

٣ - ٩ السرعة النهائية

افترضنا حتى الآن أن الاجسام التي تسقط سقوطا ذاتيا تتسارع بمعدل قدره 9.8 m/s^2 . ولكن ريشة أو قصاصة ورق صغيرة ساقطة لا تتسارع بالطبع بنفس هذا المعدل لأن من السهل أن نلاحظ أن كليهما تسقط بسرعة أقل من سقوط قطعة عملة معدنية أو حجر ، وقد وضعنا سابقا أن قوة الاحتكاك الناتجة من اندفاع الهواء على الجسم الساقط هي التي تسبب هذا التأثير . وبناء على ذلك يمكن أن يعامل الجسم كجسم يسقط سقوطا ذاتيا اذا كانت قوة الاحتكاك مهملة .

تصل الريشة الى السرعة النهائية بعد فترة قصيرة جدا من لحظة اسقاطها . وفي الحقيقة فإن أى جسم يسمح له بالسقوط مسافة كبيرة في الهواء سيصل الى سرعة ثابتة تسمى السرعة النهائية . وحيث أن الجسم لم يعد متسارعا (لان سرعته ثابتة) لا يمكن أن تؤثر على الجسم أى قوة غير متزنة ، أى أن شد الجاذبية الارضية للجسم لابد أن يكون قد اترن مع قوة ما متجهة الى أعلى . هذه القوة هي ببساطة قوة احتكاك الهواء المندفع على الجسم الساقط .

وحيث أن الريشة خفيفة وممتدة في الفراغ فإن سرعة صغيرة وقوة احتكاك هوائى صغير يلزمان للاتزان مع جذب الجاذبية الأرضية . لهذا السبب يكون متوسط السرعة النهائية للريشة الى اسفل صغير جدا ، وقد يصل الى جزء من المتر في الثانية فقط . وفي الحقيقة فإن الريشة تصل الى هذه السرعة في اقل من $1/10 \text{ s}$ من لحظة اسقاطها ، وبعد هذا الزمن يتوقف تسارع الريشة تماما .

وعموما تتصرف جميع الاجسام السابقة بنفس الطريقة . ولكن كلما كان الجسم اكثر تضاماً واكبر كثافة كلما زادت السرعة النهائية . من الامثلة النموذجية للسرعة النهائية للاجسام الساقطة (القيم تقريبية جدا) مايلي : قطرة المطر 25 ft/s ، دقيقة الدخان 0.1 ft/s ، الانسان 250 ft/s . وبالطبع فإن هذه القيم تعتمد على شكل واتجاه الجسم الساقط . يمثل الشكل ٣ - ١٤ مثالا مثيرا للسرعة النهائية .



شكل (٣ - ١٤)

مثال للسرعة النهائية .

(جريدة الديلي اكسبريس

اللندنية - استعراض

تصويرى)

ملخص :

تساعدنا النتائج العملية على صياغة قوانين الطبيعة . تلخص هذه القوانين الطريقة التي يتصرف بها العالم من حولنا . لابد أن نكون مستعدين لتعديل القوانين كما هي مصاغة في الوقت الحاضر اذا أثبتت تجارب المستقبل أن الصيغة ليست صحيحة تماما .

يتكون قانون نيوتن الأول للحركة من جزئين . يبين لنا الجزء الأول أن الجسم الساكن يستمر في حالة السكون ما لم تؤثر عليه قوة محصلة تختلف عن الصفر . ينص الجزء الثاني على أن السرعة الموجهة لجسم ما لا تتغير ما لم تؤثر على الجسم قوة محصلة تختلف عن الصفر .

قانون نيوتن الثالث للحركة هو قانون الفعل ورد الفعل . ينص هذا القانون على أن أية قوة يؤثر بها الجسم A على الجسم B تكون مصحوبة بقوة مساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه يؤثر بها الجسم B على A .

يلخص قانون نيوتن الثاني بالمعادلة $F = ma$. ينطبق هذا القانون على جسم كتلته m وتؤثر عليه قوة قدرها F تسارع الجسم a في نفس اتجاه F .

تقيس كتلة الجسم m القصور الذاتي لهذا الجسم . اذا كانت m كبيرة فان القصور الذاتي للجسم يكون كبيرا : من الصعب تحريك هذا الجسم اذا كان ساكنا . من الصعب وقف الجسم أو حركه عن اتجاهه اذا كان متحركاً . وحدات الكتلة هي الكيلوجرام (في النظام SI) والجرام (في النظام cgs) والسلج (في النظام البريطاني) .

عند استخدام القانون $F = ma$ لابد أن تكون الوحدات من نفس النظام . الوحدات الواجب استخدامها في النظام SI هي النيوتن والكيلوجرام والمتر في الثانية المربعة . الوحدات المقابلة في النظام cgs هي الداين والجرام والسنتيمتر في الثانية المربعة . الوحدات المستخدمة في النظام البريطاني هي الباوند والسلج والقدم في الثانية المربعة . لايجب استخدام أى وحدات اخرى .

إذا كان وزن الجسم الذى كتلته m هو W مقاسا في مكان تسارع الجاذبية فيه هو g فإن $W = mg$ ، وهذا ببساطة هو القانون $\vec{F} = m\vec{a}$ مكتوبا في حالة تجربة السقوط الذاتى .

إذا كان الجسم منزلقا فانه يعانى قوة معوقة f تسمى قوة الاحتكاك . يدفع السطح الحامل الجسم المنزلق بقوة قدرها Y حيث Y متجهة في الاتجاه العمودى على السطح . وجد اذن أن $f = \mu Y$ حيث μ يسمى معامل احتكاك السطحين المعنيين .

يتعرض الجسم الساقط في الهواء أو أى غاز آخر أو مائع لقوة معوقة هي قوة الاحتكاك ، وحيث أن هذه القوة تزداد مع سرعة السقوط فانها ستصبح في نهاية الامر مساوية لشدة الجاذبية الأرضية . عندئذ ستختفى أية قوة غير متزنة مؤثرة على الجسم . لذلك فان الجسم سيسقط بسرعة ثابتة تسمى السرعة (أو معدل الحركة) النهائية .

الحد الأدنى من الاهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب ان تكون قادرا على عمل الآتى :

- (١) صياغة قانون نيوتن الأول واعطاء بعض الامثلة لتوضيح كل جزء منه .
- (٢) صياغة قانون نيوتن الثالث . توضيح قوى الفعل ورد الفعل في أى موقف بسيط معروف .
- (٣) تسجيل قائمة لبعض الاجسام المعروفة بحيث تكتب بالترتيب من أقل الى اكبر قيمة للقصور الذاتى . اختيار تلك الكميات من القائمة التالية التى تسبب دائما عند تغيرها تغيرا كبيرا في القصور الذاتى : الحجم ، الشكل ، الوزن ، معدل الحركة ، السرعة ، الكتلة ، الحركة .
- (٤) صياغة قانون نيوتن الثانى بالكلمات وفي صورة معادلة رياضية . شرح معنى F في هذا القانون بوضوح .
- (٥) تسجيل قائمة بالوحدات الاساسية للزمن والطول والكتلة في كل من انظمتنا الثلاثة للوحدات . تسجيل قائمة بوحدات القوة المستخدمة في كل من هذه الانظمة الثلاثة ايضا .
- (٦) كتابة المعادلة التى تربط الكتلة بالوزن . شرح العلاقة بين هذه المعادلة والقانون $F = ma$. توضيح كيفية تغير كل من m ، g ، W عندما يذهب شخص ما من الأرض الى القمر .
- (٧) حساب F أو m أو a لجسم بالاستعانة بالمعلومات الكافية من القائمة التالية : القوى المؤثرة على الجسم ، الوزن ، الكتلة ، معلومات كافية عن الحركة لحساب a .
- (٨) كتابة كمية باستخدام البادئة ، مثلا 1.2 ng على صورة الرقم 10 مرفوع الأس المناسب ، مثلا $1.2 \times 10^{-9} \text{ g}$ القدرة على اجراء العملية العكسية (انظر الملحق ٢ وكذلك هذا الفصل) .
- (٩) تعيين القوة العمودية المؤثرة على جسم منزلق باستخدام المعلومات الكافية . استخدم Y لتعيين f أو μ بمعلومية أى منهما .
- (١٠) حساب المسافة التى ينزلها جسم معلوم الوزن عندما تكون السرعة الابتدائية والقوى المؤثرة عليه معلومة .
- (١١) تحليل المواقف التى تكون الاجسام فيها مرتبطة والمشابهة لتلك المواقف التى نوقشت في المثالين التوضيحيين ٣ - ٤ و ٣ - ٥ .
- (١٢) شرح الشروط التى يمكن للجسم الساقط في الهواء ان يصل فيها الى السرعة النهائية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب ان تكون قادرا على شرح كل من الآتى :

القانون الفيزيائى

القصور الذاتى

قوانين نيوتن الثلاثة للحركة

انظمة الوحدات SI و cgs والنظام البيطاني .

وحدات الكتلة (كيلوجرام ، جرام ، سلج)

وحدات القوة (نيوتن ، داين ، باوند)

القوة العمودية

معامل الاحتكاك μ .

اسئلة وتخمينات

(١) صدمت سيارة سيارة اخرى ساكنة من الخلف . وكانت الاصابات التي تعرض لها كلا السائقين (بفرض حدوث الاصابات) ذات طبيعة مختلفة . اشرح ما يحدث لكل سائق .

(٢) ماذا يحدث لزبرك مقعد سيارة تجلس عليه سيدة عندما تمر السيارة فوق نتوء كبير في الطريق ؟ اشرح .

(٣) عين بوضوح قوى الفعل ورد الفعل في المواقف التالية : (أ) يركل لاعب كرة القدم الكرة ، (ب) تحفظ الشمس الأرض في مدارها ، (ج) تصطدم قطرة المطر بالنافذة ، (د) تنطلق رصاصة من بندقية ، (هـ) يتسارع صاروخ الى أعلى ، (و) تحترق رصاصة جذع شجرة وتقف .

(٤) هل يمكن لجسم أن يتسارع الى أسفل نحو الأرض بمعدل اكبر من g ؟

(٥) يعتقد عموماً أنه اذا سقط شخص سكران من النافذة فان اصابته تكون في المتوسط أقل من اصابة شخص غير سكران . هل يمكنك أن تشرح لماذا قد يكون هذا الاعتقاد صحيحاً ؟

(٦) لماذا يكون اشد خطورة على الغطاس أن يسقط على الممشى الخرساني المحيط بحمام السباحة عما لو سقط في الماء ؟ اشرح .

(٧) لنفرض أنك قد أسقطت قالباً من ارتفاع قدره بضعة بوصات على يدك وهي مفتوحة . لماذا تحس يدك بألم شديد اذا كانت منبسطة على المنضدة بالرغم من أنك تستطيع أن تلتقط الحجر بسهولة بدون ألم في ظروف أخرى ؟

(٨) اذا كانت هناك مخلوقات حية تعيش على احد الاجرام البعيدة في الكون ، هل يحتمل أن تستخدم هذه المخلوقات نفس وحدات الزمن والطول والوزن والكتلة التي نستخدمها نحن ؟ أى هذه الوحدات يحتمل أن تكون اكثر سهولة في فهمها واستنساخها بالنسبة لهم ؟

(٩) اذا سقطت كرة بونج بونج على المنضدة فانها ترتد مرة ثانية الى الهواء . ما الذي ركلها الى أعلى ؟

(١٠) يحس بعض الناس باحساس داخلي غريب (وعادة مايكون احساساً مزعجاً في فم المعدة) عندما يتواجدون داخل مصعد متحرك . اشرح سبب هذه الظاهرة .

(١١) رجل يقف في مصعد ماسكاً غليونه في يده . وعندما انقطع حبل المصعد دهش هذا الرجل دهشة شديدة لدرجة أنه اسقط غليونه . ماذا يحدث للغليون ؟ ولا تهمل تأثيرات الاحتكاك على اجهزة المصعد .

(١٢) قدر اقل مسافة يمكن أن تتسارع السيارة فيها من السكون الى سرعة قدرها 10 m/s اذا كان موتورها قوياً للغاية . (ق)

(١٣) من أين تأتي القوة التي تسبب تسارع لاعب القفز العالي الى أعلى عندما يترك هذا اللاعب الأرض ؟ قدر القوة التي يجب أن تؤثر على اللاعب لكي يقفز اللاعب إلى ارتفاع 2 m . (ق)

(١٤) سقطت زهرية ورد وزنها 2 lb من النافذة وكانت سرعتها قبل أن ترتطم برأس رجل مباشرة تساوي 30 ft/s قدر القوة التي تؤثر بها الزهرية على رأس الرجل . هل يتغير الأمر اذا انكسرت الزهرية ؟ ماذا يحدث اذا استبدلت الزهرية بكيس من البلاستيك مملوءاً بالقمامة ؟ (ق)

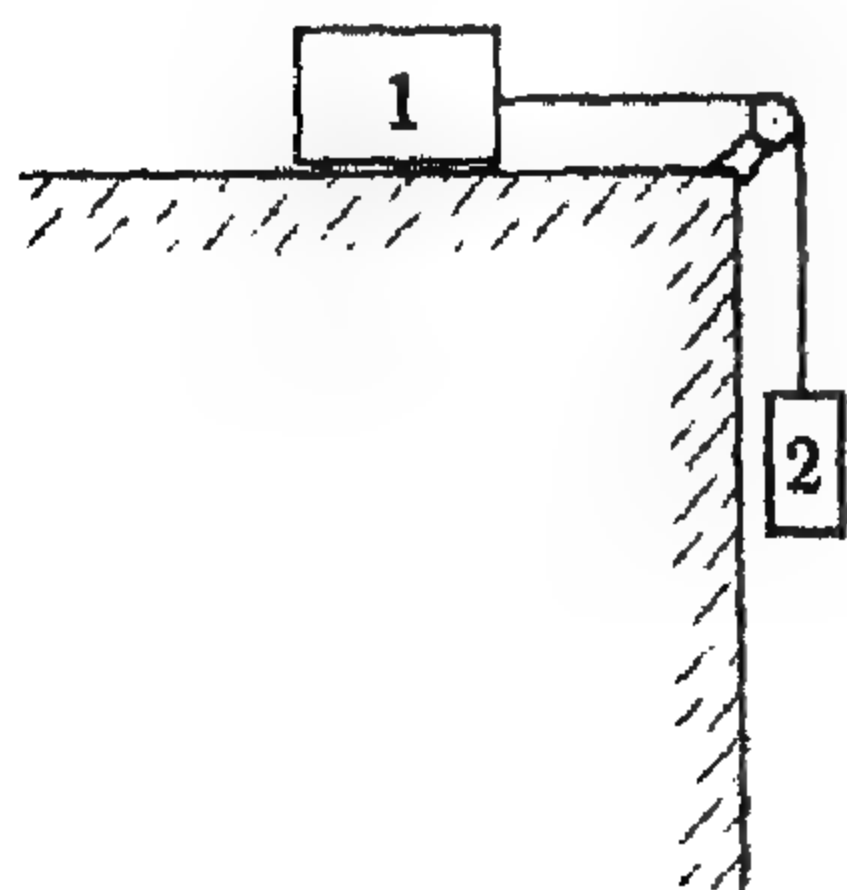
(١٥) قدر السرعة النهائية لقطرة صغيرة من الزئبق . اكثف من الماء 13.6 مرة . (ق) .

(١٦) قدر القوة التي يؤثر بها كاحليك على الأرضية عندما تقفز من قمة سلم ارتفاعه 2.0 m . لماذا يجب أن تسمح بانثناء ساقيك في مثل هذا الموقف . (ق)

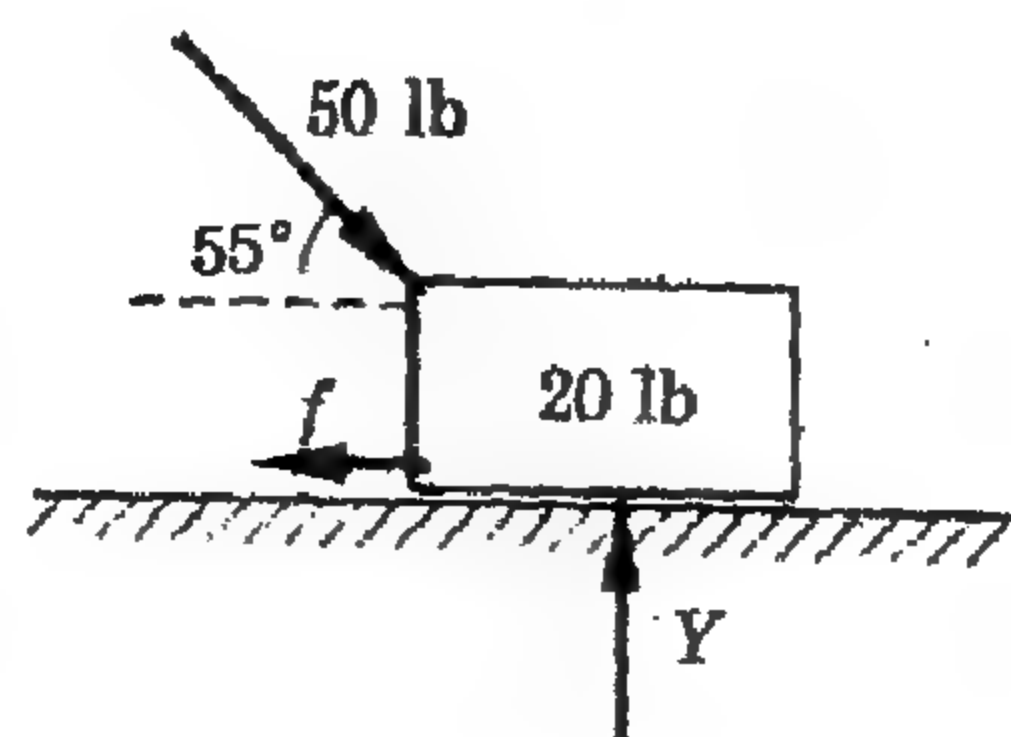
مسائل :

حول جميع المسائل المعطاه في النظام cgs الى SI قبل حلها .

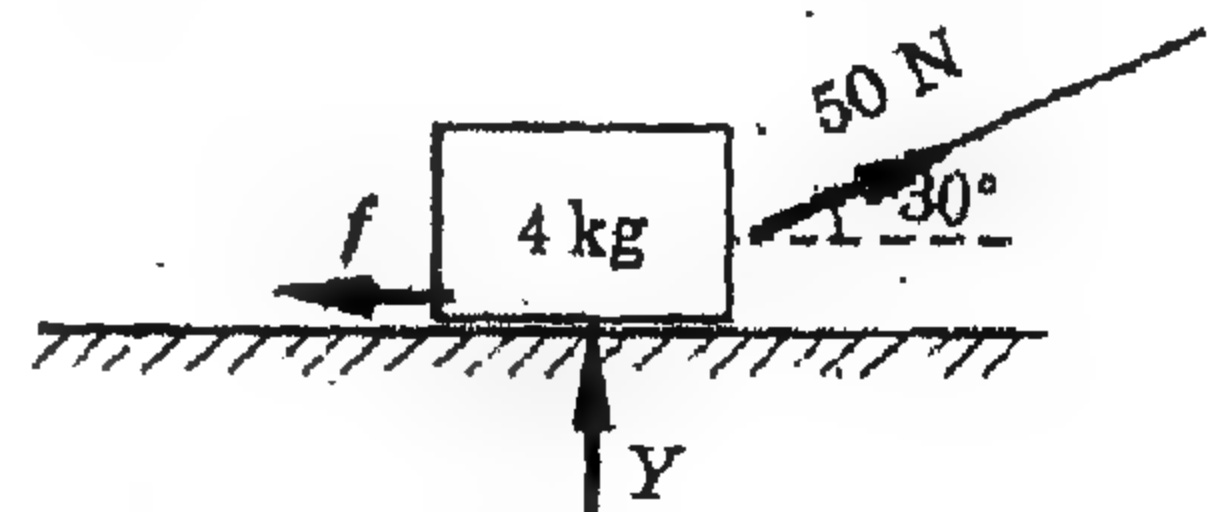
- (١) يجذب زورق بخارى سريع لاعب تزلج على الماء بسرعة ثابتة مقدارها 12 m/s وكان الشد في الحبل الذى يجذب اللاعب 140 N . ماهى قوة الاحتكاك التى تعاكس حركة اللاعب ؟
- (٢) يهبط مظلي وزنه 150 lb بالمظلة (باراشوت) الى الأرض بسرعة قدرها 25 ft/s ، وكان وزن المظلة نفسها 20 lb . ماهى القوة التى يدفع بها الهواء المظلي والمظلة إلى أعلى ؟
- (٣) أعطيت سيارة وزنها 3200 lb تسارعا قدره 0.50 ft/s^2 في طريق مستو . احسب القوة غير المترنة التى تعطى السيارة هذا التسارع اذا كان الاحتكاك مهملا .
- (٤) يلزم وقف سيارة وزنها 1300 Kg متحركة بمعدل 20 m/s في مسافة قدرها 80 m . ماهو تقاصر السيارة بفرض أنه منتظم ؟ وماقيمة القوة غير المترنة الضرورية لذلك ؟
- (٥) يراد قطر سيارة كتلتها 1500 Kg بالاستعانة بسيارة اخرى فاذا كانت السيارة المقطورة تحتاج الى مسافة قدرها 3.0 m لكى تتسارع بانتظام من السكون الى سرعة قدرها 2.0 m/s ، فماهى القوة التى يجب أن يتحملها حبل القطر ؟ اكتب اجابتك بالنيوتن والباوند .
- (٦) قوة الاحتكاك التى تعوق حركة صندوق معين كتله 400 lb فوق ارض مستوية هى 100 lb . ماهو التسارع اللازم اعطائه لهذا الصندوق اذا سحب بقوة قدرها 200 lb باستخدام حبل مائل بزاوية قدرها 53° على الافقى ؟
- (٧) كانت سيارة وزنها 3200 lb تتحرك بمعدل 60 ft/s عندما اصطدمت بشجرة فتوقفت بعد مسافة قدرها 5 ft . ماقيمة متوسط القوة المعيقة التى أثرت بها الشجرة على السيارة ؟
- (٨) يجذب شخص كتلة قدرها 5 kg رأسيا الى أعلى مستخدما حبلًا يستطيع بالكاد حمل كثافة قدرها 20 kg في حالة السكون . ماهو أقصى تسارع يمكن لهذا الشخص اعطاؤه للكتلة 5 Kg ؟
- (٩) يقف شخص وزنه 160 lb على ميزان زنبركى دقيق في داخل مصعد . ماهى قراءة الميزان عندما يتحرك المصعد (أ) الى أعلى بتسارع قدره 10 ft/s^2 ، (ب) الى اسفل بتسارع قدره 10 ft/s^2 ؟
- (١٠) علقت كتلة قدرها 100 g في خيط ثم علقت كتلة أخرى قدرها 200 g في قاع الكتلة 100 g باستخدام خيط آخر . اوجد الشد في الخيطين اذا كانت الكتلتان (أ) ساكنتان ، (ب) متسارعتان إلى اعلى بمعدل 20 cm/s^2 ، (ج) ساقطتان ذاتيا تحت تأثير الجاذبية الأرضية . الأرضية .
- (١١) معامل الاحتكاك بين صندوق وأرضية الحجرة هو 0.40 . فاذا دفع الصندوق دفعة شديدة بحيث انزلق بسرعة قدرها 5 ft/s ، فما هى المسافة التى يتحركها قبل أن يقف ؟
- (١٢) اوجد تسارع القالب الذى كتلته 4 Kg والمبين في شكل م ٣ - ١ اذا كان معامل الاحتكاك بين القالب والسطح 0.60 .



شكل (م ٣ - ٣)



شكل (م ٣ - ٢)



شكل (م ٣ - ١)

(١٣) اوجد تسارع القالب الموضح في شكل م ٣ - ٢ إذا كان معامل الاحتكاك بين القالب والسطح هو 0.40 .

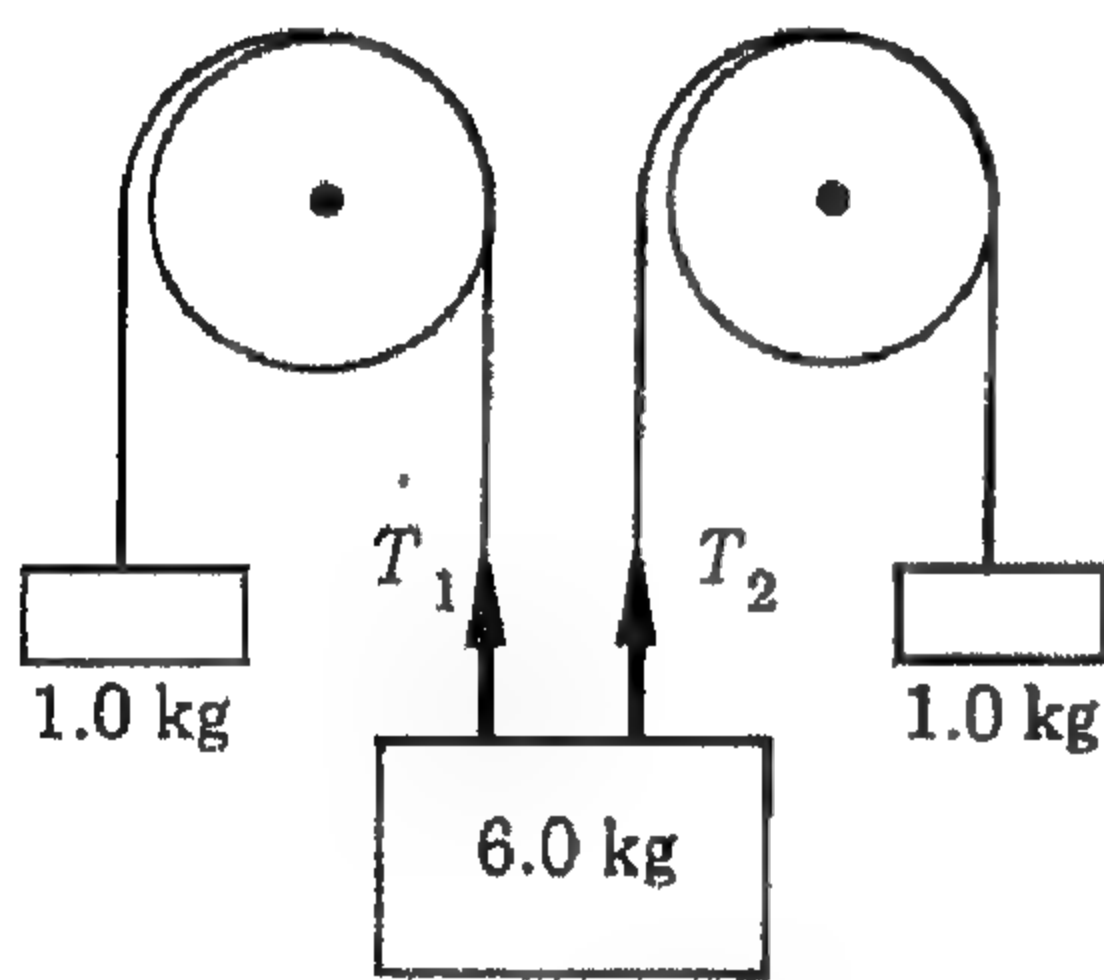
(١٤) تقاصرت شاحنة تتحرك في طريق مستو استعدادا للوقوف وكانت هذه الشاحنة تحمل صندوقا كبيرا في مؤخرتها. فإذا كان معامل الاحتكاك بين الصندوق وقاع الشاحنة يساوي 0.55 قبل بدء انزلاق الصندوق مباشرة ، فما هو أقصى تسارع يمكن ان تكتسبه الشاحنة بحيث لا ينزلق الصندوق ؟

(١٥) في الشكل م ٣ - ٣ كتلة القالب 1 هي 2.50 kg وكتلة القالب 2 هي 1.60 kg . اوجد تسارع القالبين وكذلك الشد في الحيط الذي يوصلهما اذا كان الاحتكاك مهملًا . كرر الحل بفرض ان هناك قوة احتكاك مقدارها 12.0 N تعوق حركة القالب 1 .

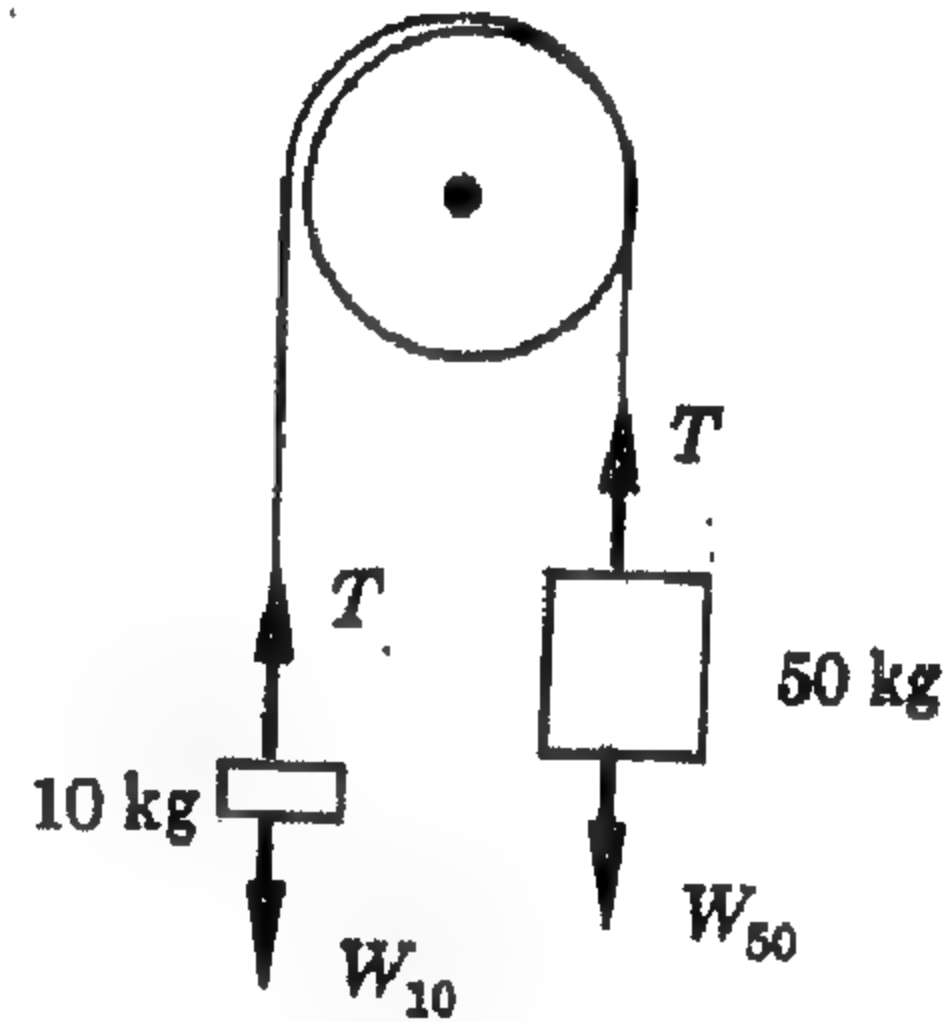
(١٦) في الشكل م ٣ - ٣ كتلة الجسم 1 هي 3000 g وكتلة الجسم 2 هي 2000 g . وعند تحرير المجموعة وجد أن الجسم 2 يسقط مسافة قدرها 50 cm في زمن قدره 1.50 s . ماقيمة قوة الاحتكاك المعاكسة لحركة الجسم 1 ؟ افترض عدم وجود قوى احتكاك عندما تكون المجموعة في حالة السكون .

(١٧) ربطت كتلتان قيمة كل منهما 4 Kg في طرفي حبل ثم علق الحبل على بكرة لا احتكاكية لتكون آلة أتوود . فإذا اضيفت الآن 2000 g الى احدى الكتلتين ، (أ) فما هو الشد في الحبل ، (ب) وماهو الزمن اللازم لسقوط الكتلة الأكبر مسافة 2 m ؟

(١٨) اوجد الشد في الحبل والزمن اللازم لكي تتحرك الكتلتان الموضحتان في شكل م ٣ - ٤ مسافة 50 cm من السكون . افترض ان البكرة لا احتكاكية وعديمة الكتلة



شكل (م ٣ - ٥)



شكل (م ٣ - ٤)

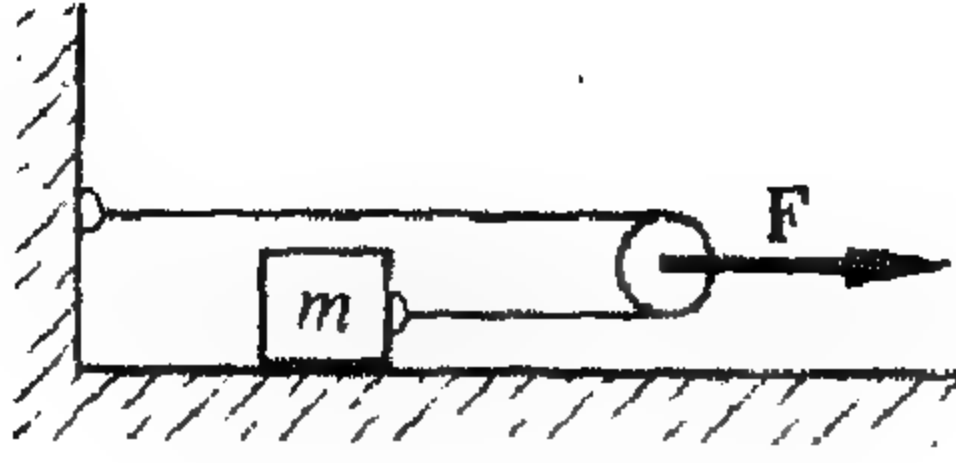
(١٩) اوجد T_1 وكذلك تسارع القالب الذي كتلته 6 kg في الموقف الموضح في شكل م ٣ - ٥ .

(٢٠)* علقت كتلة قدرها 500 g في نهاية سلك زنبركي خفيف ، وعند اضافة 200 g الى الكتلة 500 g استطال السلك الزنبركي بمقدار 10 cm . ثم رفعت الكتلة 200 g فجأة . ماهو تسارع الكتلة 500 g في اللحظة التالية للرفع مباشرة ؟

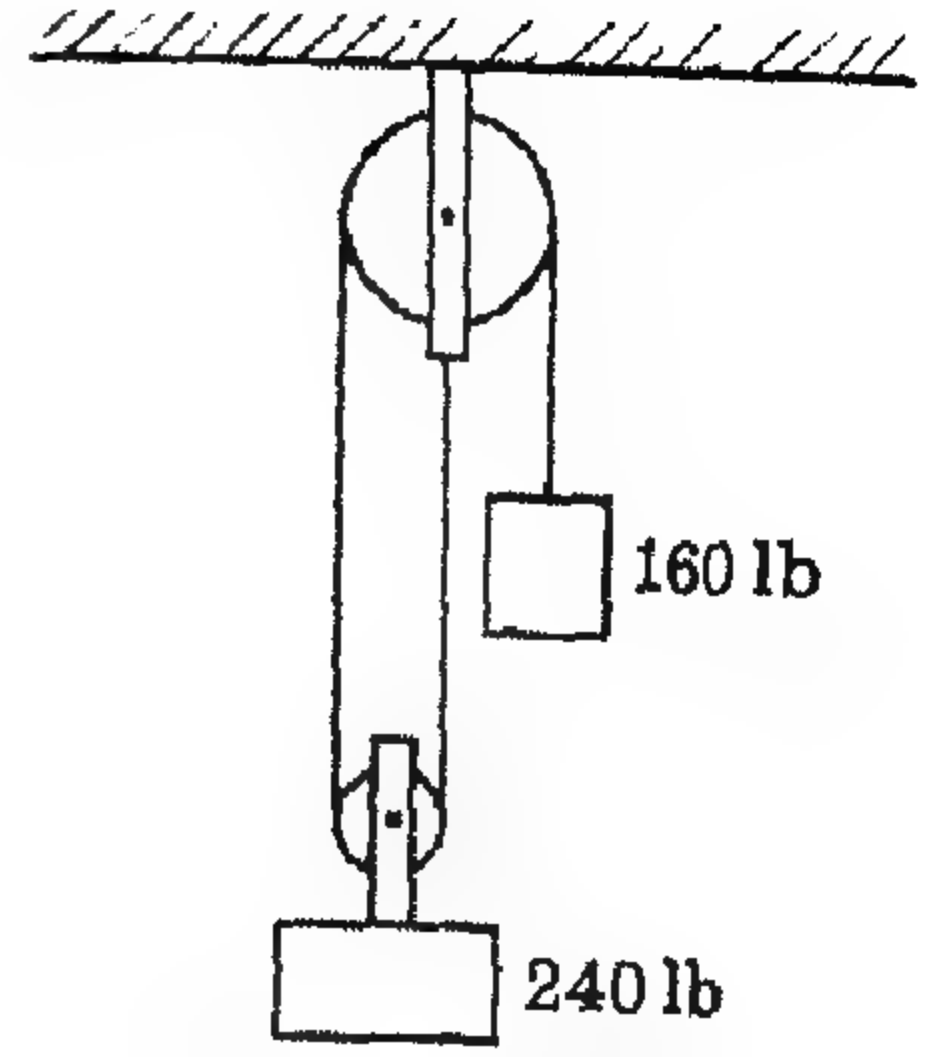
(٢١) اودعت عالمة فيزياء في شاحنة صندوقية مغلقة لاحد القطارات ، فعلمت جسما وزنه 8 lb كبندول بسيط في السقف . وعندما بدأ القطار في التسارع لاحظت هذه العالمة أن البندول يتعلق مستقرا في وضع يميل بزاوية قدرها 10° على الرأسى . ماقيمة تسارع القطار ؟ هل تحتاج هذه العالمة حقيقة لأن تعلم وزن الجسم لكي تحل هذه المسألة ؟

(٢٢)** في الشكل م ٣ - ٦ وزن الجسم الكبير هو 240 lb ووزن الجسم الصغير هو 160 lb . اوجد الشد في السلك وكذلك تسارع كل من الثقليين . تلميح : لاحظ ان الثقل الكبير يتحرك نصف المسافة التي يتحركها الثقل الصغير فقط . وحيث ان البكرتين لا احتكاكيتين وعديمتي الكتلة فان الشد في السلك متساو في كل اجزائه .

(٢٣)** في الشكل م ٣ - ٧ يفترض ان البكرة عديمة الكتلة ولا احتكاكية . اوجد تسارع الكتلة m بدلالة F اذا لم يكن هناك احتكاك بين السطح والكتلة m . كرر العمل بفرض وجود قوة احتكاك مؤثرة على m قيمتها f .

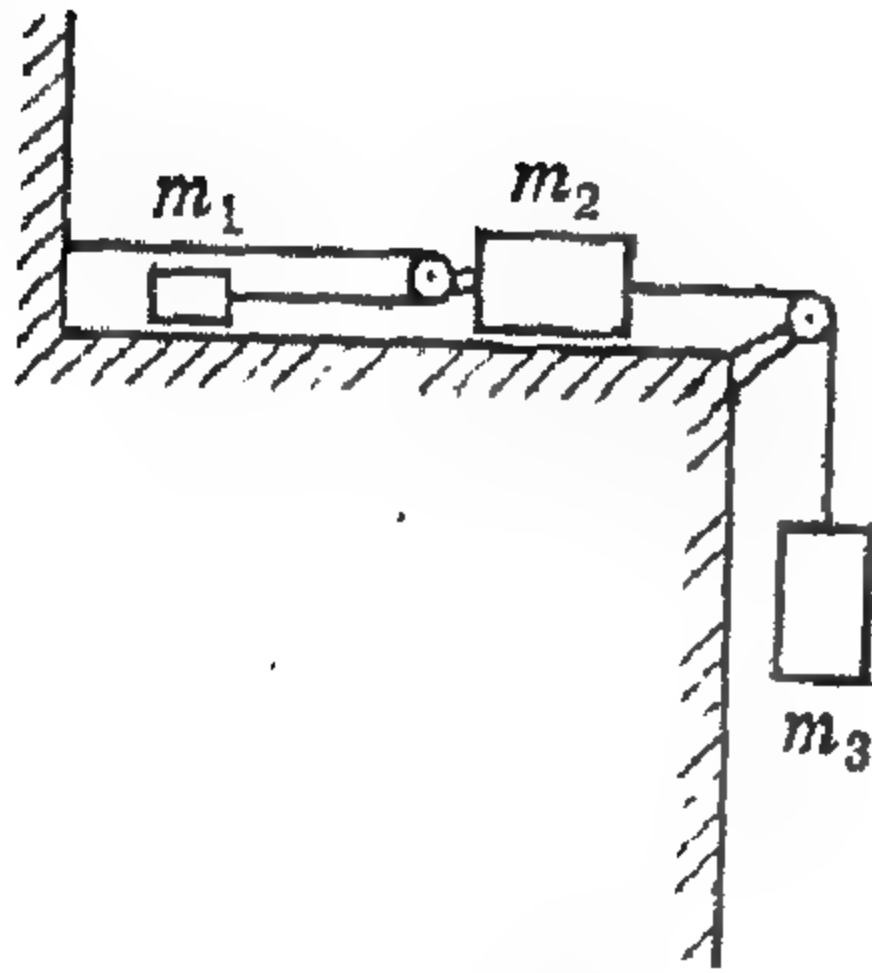


شكل (م ٣ - ٧)

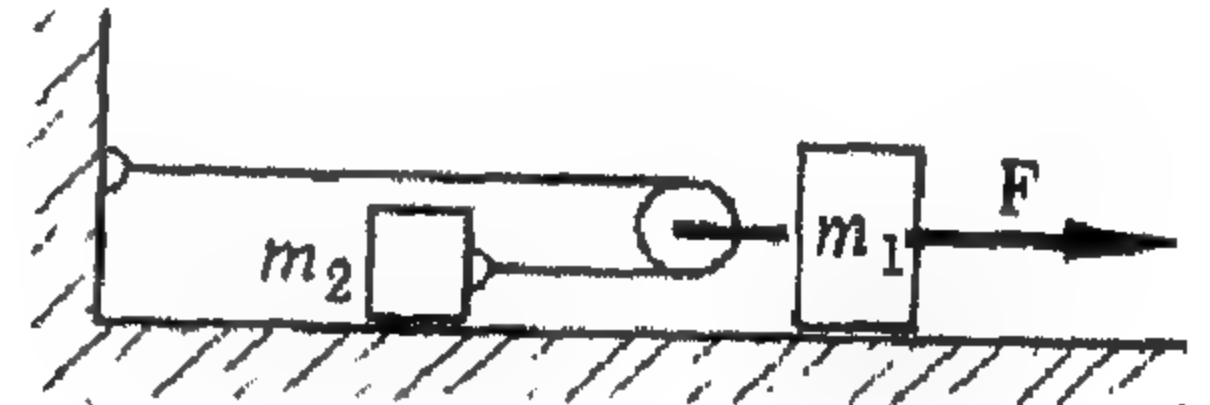


شكل (م ٣ - ٦)

- ٢٤*** في الشكل م ٣ - ٨ يفترض ان الاحتكاك بين القالبين والمنضدة مهملا . احسب الشد في الخيط وتسارع الكتلة m_2 اذا كانت $F = 0.40 \text{ N}$ ، $m_2 = 200 \text{ g}$ ، $m_1 = 300 \text{ g}$. لاحظ أن $a_2 = 2a_1$.
- ٢٥*** اوجد الشد في الحبلين وتسارع كل من القالبين الموضحين في شكل م ٣ - ٩ اذا كان الاحتكاك مهملا . افترض ان البكرتين عديمتي الكتلة ولا احتكاكيتين . ($m_1 = 200 \text{ g}$; $m_2 = 500 \text{ g}$; $m_3 = 300 \text{ g}$.)
- ٢٦*** اذا كانت قوة الاحتكاك المؤثرة على كل من القالبين المنزلقين على المنضدة الموضحة في شكل م ٣ - ٩ هي 2 lb ، اوجد تسارع كل من القالبين والشد في الخيوط . (وزن الكتل 1 ، 2 ، 3 هي 8 lb ، 32 lb ، 16 lb على الترتيب) .



شكل (م ٣ - ٩)



شكل (م ٣ - ٨)

الفصل الرابع

الحركة تحت تأثير الجاذبية الأرضية

في الفصل السابق استخدمنا حقيقة أن الأرض تؤثر بقوة جاذبية ثقالية على الاجسام القريبة منها . وفي هذا الفصل سنجد أن التجاذب الثقالي يحدث بين أى قطعتين من المادة . كذلك فإننا سوف نذكر ونناقش الصورة الرياضية لهذه القوة . وبالإستعانة بهذه المعلومات سنكون قادرين على فهم حركة الأجسام التى تتحرك فى اتجاه يميل بزاوية ما على سطح الأرض. سندرس أيضا هذا النوع من الحركة آخذين حركة المقذوفات كمثال لها .

٤ - ١ قانون نيوتن للجاذبية

اكتشف علماء الفلك قبل نيوتن بفترة كبيرة أن كواكب نظامنا الشمسي تدور حول الشمس . وقد عرفت حركات هذه الكواكب بدقة كبيرة كما أمكن التنبؤ بحركاتها في المستقبل بمنتى الدقة . ولكن هذا قد تحقق في الواقع بدون فهم حقيقى لأسباب هذه الحركات .

كان نيوتن أول من وضع طبيعة القوى المسئولة عن الحركة الكوكبية . وحيث أنه كان يعلم أن « الجسم المتحرك سيستمر في الحركة في خط مستقيم الى الأبد ما لم تؤثر عليه قوة خارجية » فقد كان من الواضح له أن هناك قوة خارجية تؤثر على كل كوكب . ونظرا لأن الكواكب تتحرك في مدارات دائرية تقريبا فلا بد من وجود قوة خارجية لكي تسبب انحرافها عن المسار المستقيم . وتبين التجربة أن الكرة المربوطة في نهاية خيط والتي تتحرك في دائرة تحتفظ بهذا المسار الدائري بفضل جذب الخيط لها ، ويتجه جذب الخيط للكرة نحو مركز الدائرة دائما . يسمى هذا الجذب للجسم نحو مركز الدائرة باسم القوة الجاذبة المركزية ، وسنناقشه بتفصيل أكثر في الفصل الثامن .

استنتج نيوتن أن الكواكب تقع تحت تأثير قوة جاذبة متجهة من الكوكب نحو الشمس وأن هذه القوة تحفظ الكوكب في مساره الدائري أو مداره حول الشمس . وقد تصور أن الشمس تؤثر على الكواكب بقوة جاذبة من نوع ما . علاوة على ذلك ، حيث أن القمر يدور حول الأرض ، فلا بد من وجود تجاذب بين القمر والأرض ، وهذه القوة الجاذبة المؤثرة على القمر هي التي تحفظه في مداره حول الأرض . وهناك أيضا أقمار تدور حول الكواكب الأخرى ، وعليه فإن هذا التجاذب بين جسم وآخر هو ظاهرة عامة .

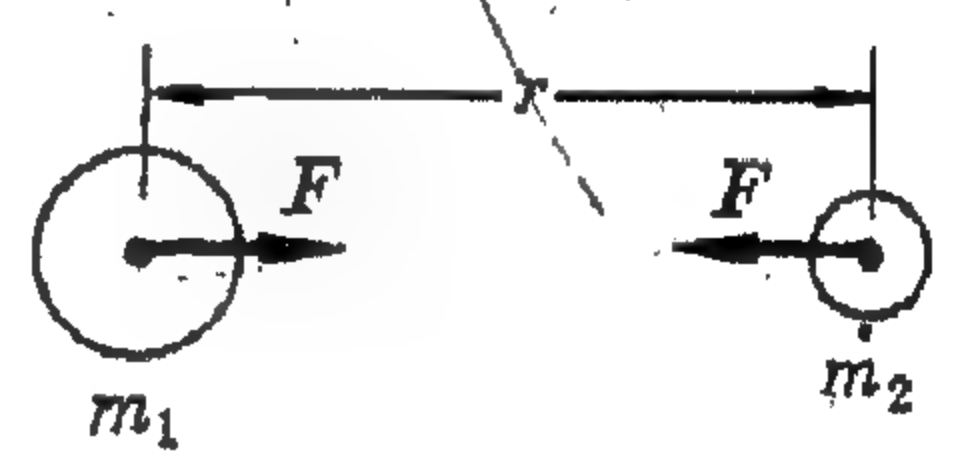
كان نيوتن أول من عبر عن القوة الجاذبة بين جسمين في صورة رياضية . فقد قارن نيوتن الطريقة التي يجب أن تتحرك بها الكواكب تحت تأثير قوى جاذبة افتراضية مختلفة بحركتها المعروفة . فوجد أن نوعا واحدا من القوى هو الذى يؤدي الى حركة مطابقة تماما للحركة المعروفة وهذه القوة تتناسب طرديا مع حاصل ضرب كتلتى الجسمين وتتناسب عكسيا مع مربع المسافة بينهما . فإذا كانت المسافة بين مركزي الجسمين الكرويين الموضحين في شكل ٤ - ١ هي r وكانت كتلتا الجسمين هما m_1 و m_2 فإن القوة الجاذبة التي تؤثر بها احدى الكرتين على الأخرى ستعطى

بالمعادلة* :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (٤ - ١)$$

شكل (٤ - ١) :

يعبرنا قانون الفعل ورد الفعل أن قوة التجاذب الثقالي المؤثرة على احدى الكرتين متساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه للقوة المؤثرة على الكرة الأخرى .

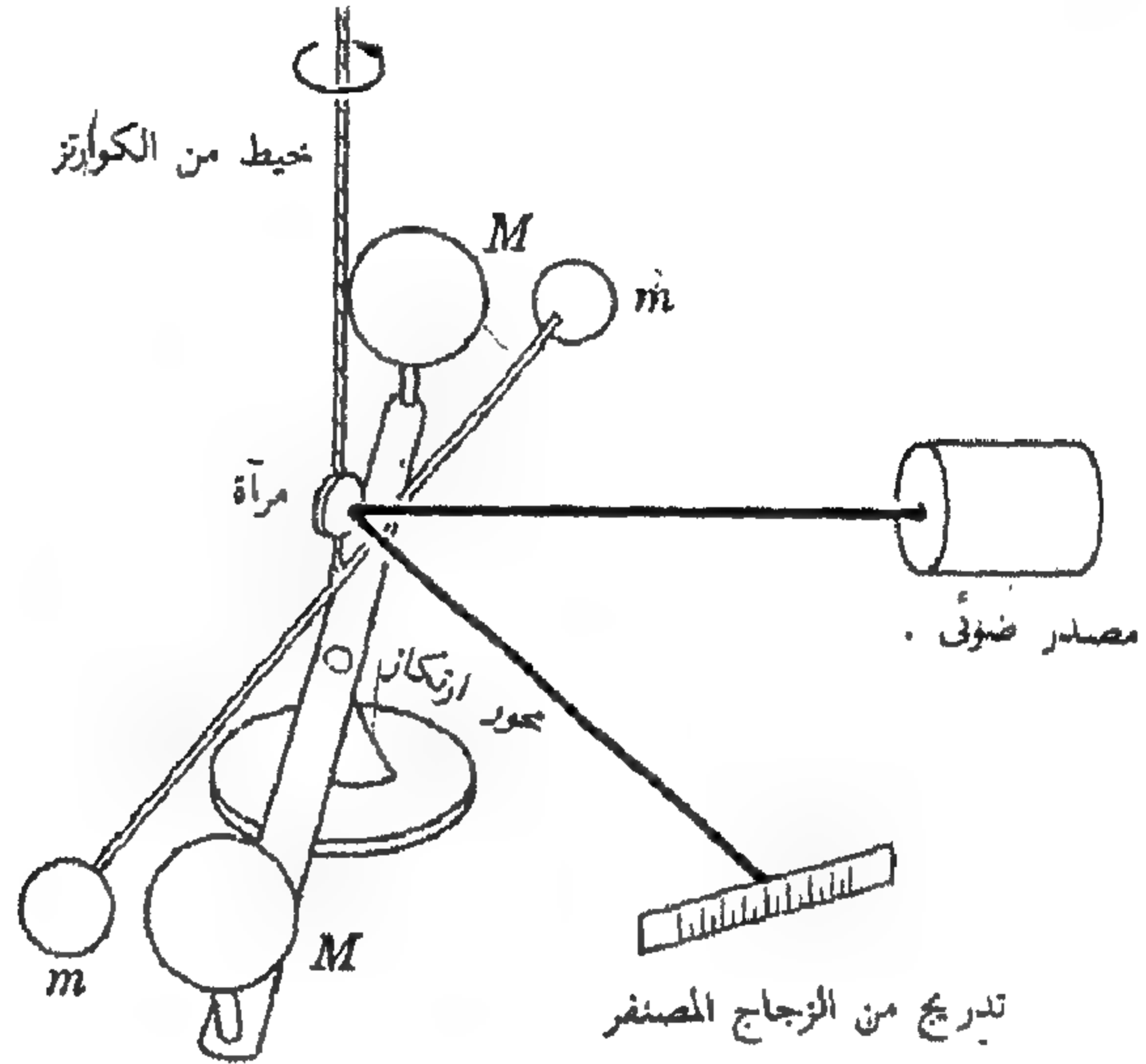


* إذا لم يكن الجسمان كرويان فإن قيمة r الواجب استخدامها ستكون أكثر تعقيدا . فضلا عن ذلك ، إذا كان الجسمان صغيرين بالمقارنة بمسافة الانفصال ، فإن r يمكن اعتبارها بتقريب كبير مسافة انفصال أى نقطتين على الجسمين .

قانون الجاذبية
العام لنيوتن

حيث G ثابت تناسب قيمته مذكورة فيما بعد . وهذا هو قانون الجاذبية
العام لنيوتن .

من الضروري هنا أن نلاحظ أن الجسم m_1 يجذب الجسم الآخر m_2 بقوة قدرها F ، ولكن قانون الفعل ورد الفعل لنيوتن يبين لنا أن الجسم m_1 نفسه سيحس بقوة رد فعل مساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه . وهذا يوضح السبب في أننا قد بينا القوتين المتساويتين مقداراً والمتضادتين اتجاههما المؤثرتين على الكرتين في شكل ٤ - ١ .



شكل (٤ - ٢)
رسم تخطيطي لميزان
كافنديش . لاحظ كيف
يستخدم الشعاع الضوئي
لكشف التواء الخيط .

لتطبيق قانون الجاذبية العام لنيوتن يجب معرفة ثابت الجاذبية G في المعادلة (٤ - ١) ولسوء الحظ لا يمكن حساب قيمة هذا الثابت نظرياً ، ولكن يمكن تعيينها بالتجربة فقط . وقد كان هنري كافنديش أول من عين قيمة ثابت الجاذبية في عام ١٧٩٨ مستخدماً جهازاً يسمى ميزان كافنديش ، ويمثل شكل ٤ - ٢ أحد أشكال هذا الجهاز . الكتلتان الصغيرتان m معلقتان في خيط رفيع دقيق جداً مصنوع من الكوارتز . عند تحريك الكتلتين الكبيرتين M بحيث تقتربان من الكتلتين الصغيرتين m يسبب التجاذب بين m و M التواء الخيط . وبعد معايرة الجهاز بحيث تعرف القوة اللازمة لحدوث التواء معين يمكن حساب قوة التجاذب بين m و M مباشرة من قيمة التواء الخيط المقاسة . وحيث أن m و M و r و F معلومة جميعها ، يمكننا إذن التعويض في المعادلة (٤ - ١) لنحصل على :

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

ثم تحل المعادلة لإيجاد المجهول الوحيد G .

وعملياً هذه التجربة دقيقة للغاية لأن قوة التجاذب صغيرة جداً . ولقياس الالتواء الصغير جداً للخيط يسمح لشعاع ضوئي بالانعكاس على مرآة مثبتة في مجموعة

الخيط . وهذه الطريقة فان أى التواء ضئيل فى الخيط يسبب انحرافا محسوسا للشعاع يمكن قياسه بسهولة أكثر . (يعرف استخدام الشعاع الضوئى بهذه الطريقة باسم الذراع البصرية) . ونظرا لرقه الخيط فان أقل حركة للهواء بالقرب منه ستعطل القياسات . لذلك فمن الضرورى اتخاذ التدابير اللازمة للتخلص من حركة واهتزاز الهواء اذا أريد الحصول على نتائج موثوق بها . وطبقا لأدق القياسات المتاحة فى الوقت الحاضر لثابت الجاذبية فان قيمة G هى كالتالى :

$$G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

مثال توضيحي ٤ - ١ : بمجرد معرفة قيمة G يصبح من الممكن تعيين كتلة الأرض . لنفعل ذلك الآن .

طريقة الحل : لتحقيق ذلك يلزمنا ببساطة معرفة القوة التى تجذب بها الأرض جسما موجودا على سطحها . فمثلا ، وزن الجسم الذى كتلته m يساوى $W = mg$. ولكن هذه هى القوة التى تجذب بها الأرض وكتلتها M_{earth} هذا الجسم . وحيث أن المسافة بين مركزي الكتلتين M_{earth} و m ، هو ببساطة نصف قطر الأرض R_{earth} ، فان قانون الجاذبية يمكن كتابته على الصورة :

$$W = G \frac{M_{\text{earth}} m}{R_{\text{earth}}^2} \quad (٤ - ٢)$$

وحيث أن $W = mg$ ، فان المعادلة السابقة تصبح :

$$mg = G \frac{M_{\text{earth}} m}{R_{\text{earth}}^2}$$

وباختزال m من الطرفين نجد أن :

$$g = G \frac{M_{\text{earth}}}{R_{\text{earth}}^2} \quad (٤ - ٣)$$

وبالتعويض عن تسارع الجاذبية $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ونصف قطر الأرض $R_{\text{earth}} = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ فى المعادلة السابقة واستخدام قيمة G سنجد أن $M_{\text{earth}} = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$. هل يمكنك استنباط طريقة يمكن استخدامها لتعيين كتلة القمر والشمس والكواكب ؟

من المهم أن نلاحظ أن المعادلة (٤ - ٣) تبين لنا كيف يعتمد تسارع الجاذبية على المسافة R مقاسة من مركز الأرض بشرط أن يستبدل نصف قطر الأرض R_{earth} بالمسافة R . ومن الواضح أنه كلما زادت R كلما قل g . ويمكن التأكد من هذه الحقيقة (حقيقة أن g يعتمد على المسافة من مركز الأرض) ، وقد تم ذلك بالفعل ، بقياس الفرق بين g عند مستوى سطح البحر وفوق قمم الجبال . وحيث أن السفر فى الفضاء قد أصبح الآن حقيقة واقعة ، أمكن اثبات أن g تتناسب عكسيا مع

مربع المسافة من مركز الأرض بدقة كبيرة . لاحظ مع ذلك أن هذه صحيحة خارج سطح الأرض فقط . أما تحت سطح الأرض فإن المعادلة (٤ - ٣) غير صحيحة ولا يمكن تطبيقها .

تعريف يستعمل مصطلح مجال الجاذبية كثيرا ، وهو يعنى فى الحياة اليومية تلك المنطقة التى تظهر فيها آثار قوة الجذب . ولكنه يعنى شيئا أكثر تحديدا بالنسبة للعالم . تعرف شدة مجال الجاذبية فى نقطة ما بأنها قوة الجذب المؤثرة على وحدة الكتلة الموجودة فى هذه النقطة . وقد تختلف شدة مجال الجاذبية من نقطة الى أخرى فى منطقة معينة ، ولكن لها قيمة محددة فى كل نقطة فى هذه المنطقة ، وهذه القيم لشدة مجال الجاذبية هى التى تكون مجال الجاذبية للمنطقة المعنية .

مجال الجاذبية وقبل أن نترك هذا الجزء يجب أن نوضح أن قانون نيوتن للجاذبية يتضمن قانون جاليليو للأجسام الساقطة سقوطا ذاتيا . وكما ترى من المعادلة (٤ - ٣) ، تشطب كتلة الجسم الساقط من الطرفين ، وعليه فإن تسارع الجاذبية واحد لجميع الأجسام أثناء السقوط الطليق وبالطبع فإن قانون نيوتن أساسى أكثر من قانون جاليليو لأنه لا يتضمن نتائج جاليليو فقط ، ولكن أيضا كثيرا من النتائج الأخرى .

مثال توضيحي ٤ - ٢ : أوجد النسبة بين وزن جسم ما على القمر ووزنه على الأرض . أوجد أيضا قيمة التسارع أثناء السقوط الذاتى على القمر .

طريقة الحل : عندما نتحدث عن وزن الجسم على الكوكب أو القمر فإننا نعنى قوة جذب الكوكب أو القمر لهذا الجسم . فى هذه الحالات تكون الأرض بعيدة بعدا كافيا لأن يجعل قوة جذبها للجسم صغيرة جدا ، فمثلا ، يبعد الجسم الموجود على سطح القمر عن الأرض حوالى 60 ضعفا قدر نصف قطر الأرض . وحيث أن التجاذب التثاقلى يقل مع $1/R^2$ فإن جذب الأرض للجسم سيمثل فقط حوالى $1/3600$ قدر وزنه على سطح الأرض . من هذا نرى أن قوة جذب الأرض لجسم موجود على القمر صغيرة جدا ويمكن عادة إهمالها .

نعلم أن جذب القمر لجسم على سطحه هو :

$$F = G \frac{mM}{R^2} = W_{\text{moon}}$$

حيث m كتلة الجسم ، M كتلة القمر ($M \approx 0.0123 M_{\text{earth}}$ ، M_{earth} هى كتلة الأرض) ، R نصف قطر القمر ($R \approx 0.27 R_{\text{earth}}$ حيث R_{earth} هو نصف قطر الأرض) . وعليه فإن وزن الجسم على القمر هو :

$$W_{\text{moon}} = 0.168 G \frac{m M_{\text{earth}}}{R_{\text{earth}}^2}$$

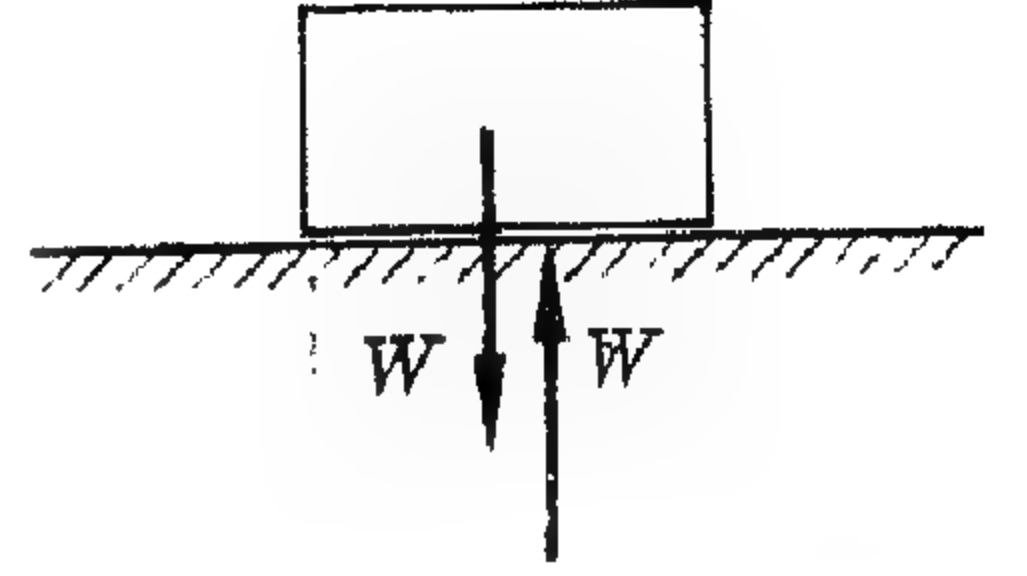
ولكن وزن الجسم على الأرض هو جذب الأرض له ، أى أن :

$$W_{\text{earth}} = G \frac{mM_{\text{earth}}}{R_{\text{earth}}^2}$$

وبمقارنة هاتين المعادلتين نجد أن :

$$\frac{W_{\text{moon}}}{W_{\text{earth}}} \approx 0.168 \approx \frac{1}{6}$$

أى أن وزن الجسم على القمر يساوى حوالى سدس وزنه على الأرض فقط .
لايجاد تسارع السقوط الذاتى على القمر تستخدم ببساطة العلاقة $F = ma$ ، حيث F هى الآن وزن الجسم بينما a هو تسارع الجاذبية .



اذن :

$$W_{\text{moon}} = mg_{\text{moon}}$$

بينما :

$$W_{\text{earth}} = mg_{\text{earth}}$$

وبقسمة المعادلة الأولى على الثانية نحصل على :

$$\frac{g_{\text{moon}}}{g_{\text{earth}}} = \frac{W_{\text{moon}}}{W_{\text{earth}}} \approx \frac{1}{6}$$

أى أن :

$$g_{\text{moon}} \approx \frac{g_{\text{earth}}}{6} = 1.6 \text{ m/s}^2$$

شكل (٤ - ٣)

حيث أن القالب فى حالة توازن فان جذب الجاذبية الأرضية له الى أسفل لابد أن يتزن مع دفع الأرضية الى أعلى .

٤ - ٢ الحركة على مستوى مائل

إذا وجدت كتلة مادية فى حالة سكون على أرض مستوية فانها ستظل ساكنة مالم يدفعها شخص ما . وعدم تحرك الكتلة لاي معنى عدم وجود قوى مؤثرة عليها ، فنحن نعلم أن الجاذبية الأرضية تجذبها الى أسفل . ومع ذلك فالكتلة متزنة لأن دفع الأرض لها الى أعلى يتزن مع جذب الجاذبية الأرضية ، وهذا موضح فى شكل ٤ - ٣ .
ويعتبر تطبيق القانون $F = ma$ على هذه الحالة غير ذى معنى لأن القوة غير المتزنة F تساوى صفراً ، وعليه فان a تساوى صفراً كذلك .

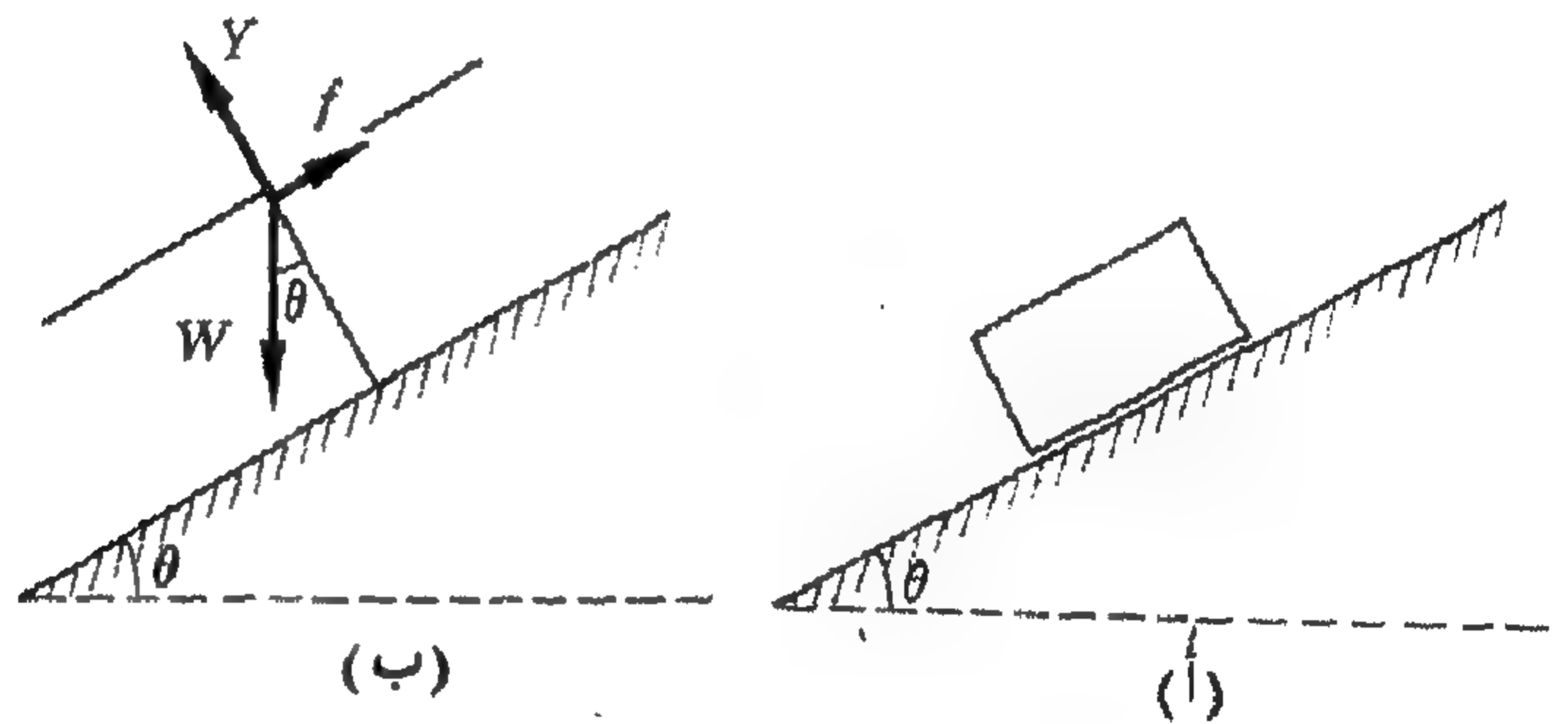
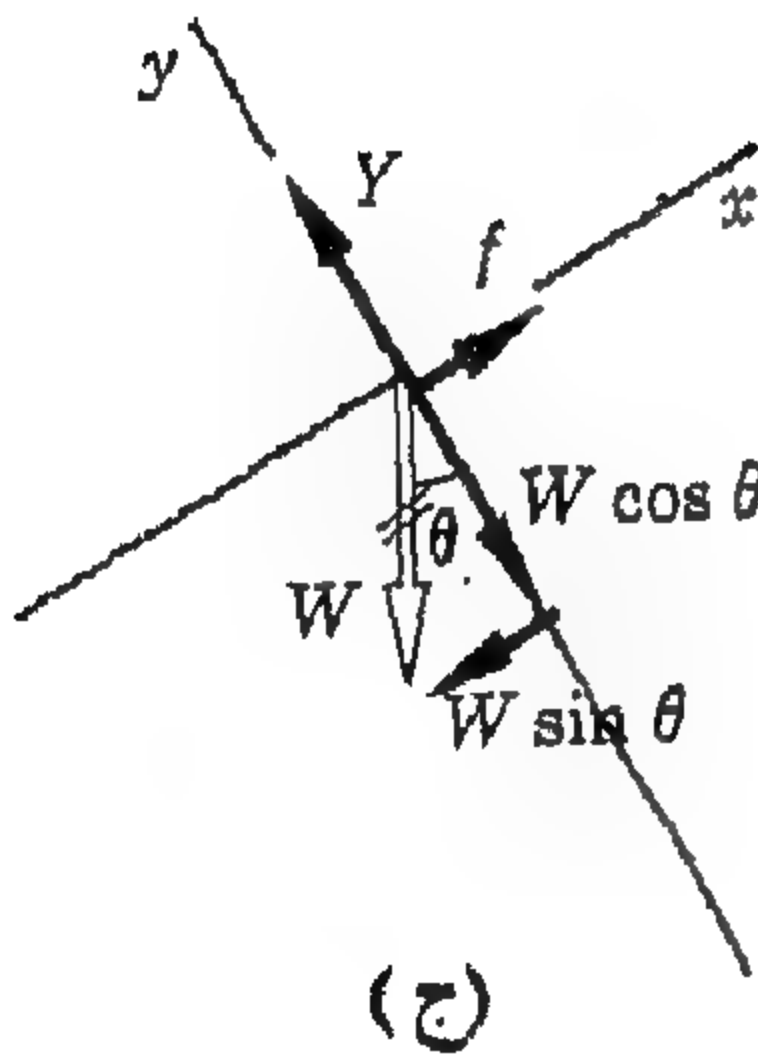
مثال توضيحي ٤ - ٣ : لندرس الآن حالة قالب موضوع على مستوى مائل، وهى الحالة المبينة فى شكل ٤ - ٤ أ . ماهى القوى التى تؤثر على القالب ؟

طريقة الحل : نعلم مما سبق أن الجاذبية الأرضية تجذب الجسم رأسياً الى أسفل بقوة قدرها W . أما القوة المؤثرة عند السطح المائل فانها الآن أكثر تعقيداً بعض الشيء . من المعتاد ومن المناسب اعتباراً أن القوة التى يؤثر بها المستوى المائل على القالب تتكون من جزئين . الجزء الأول ، وهو الدفع المتجه عمودياً على سطح المستوى

المائل ، موضح بالمتجه Y في رسم بيان الجسم الحر في شكل ٤ - ٤ ب ، ويلاحظ أن هذه القوة قد سميت بالقوة العمودية في الجزء ٣ - ٨ . بالإضافة الى ذلك هناك أيضا قوة الاحتكاك المؤثرة عند السطح المستوي المائل والتي تدفع القالب بحيث تمنعه من الانزلاق إلى أسفل على المستوي المائل ، وهذه القوة موضحة بالمتجه f في رسم بيان الجسم الحر .

من الواضح أنه اذا تحرك الجسم ، أى اذا كانت قوة الاحتكاك صغيرة جدا بحيث لا يمكنها أن تمنع القالب من الانزلاق ، فانه سوف يتحرك على المستوي المائل الى أسفل في اتجاه مواز لسطحه . وحيث أن الحركة تتم في موازاة المستوي المائل ، فمن المناسب أن نأخذ المحورين x و y في اتجاه مواز للمستوي المائل ومتعامد معه على الترتيب ، كما هو مبين في شكل ٤ - ٤ ج . (في البداية وحتى تعتاد على المحاور المائلة يمكنك ادارة الصفحة بحيث يأخذ المحور x اتجاهها افقيا) . يلاحظ أن f و Y متجهان بالفعل في الاتجاهين الصحيحين ، ولكن W فقط هي التي تحتاج الى تحليلها الى مركبتين وهما موضحتان في الشكل .

والآن ، حيث أننا نعلم أن القالب لن يخترق المستوي المائل أو يطفو فوقه فلن تحدث حركة في الاتجاه y وعليه فإن مجموع القوى في الاتجاه y لابد أن يساوى صفرا . وهذا يعنى أن (انظر شكل ٤ - ٤ ج) .



شكل (٤ - ٤)

عند التعامل مع جسم موضوع فوق مستوى مائل من المناسب أن يؤخذ المحوران x و y في اتجاه مواز للمستوي المائل ومتعامد معه على الترتيب كما هو مبين . عندئذ تحلل القوى الى مركبات موازية لهذين المحورين .

(٤ - ٤)

$$Y - W \cos \theta = 0$$

واذا كان الاحتكاك كافيا لأن يحفظ القالب في مكانه فان مجموع القوى في الاتجاه x لابد أن يساوى صفرا كذلك . عندئذ نجد أن :

(٥ - ٤)

$$W \sin \theta - f = 0$$

أما اذا كانت قوة الاحتكاك صغيرة بحيث لا تستطيع أن تمنع القالب من الانزلاق فان القالب سيقع تحت تأثير قوة غير متزنة معينة ، وتعطى هذه القوة بالعلاقة :

(٤ - ٦)

$$F = W \sin \theta - f$$

هذه القوة غير المتزنة ستسبب تسارع القالب . ومن قانون نيوتن نعلم أن :

$$F = ma$$

ومنه :

(٤ - ٧)

$$W \sin \theta - f = ma$$

ومن ثم يمكننا حساب تسارع القالب .

من المهم أن نلاحظ أن $W = mg$ ، وعليه فإن معادلة التسارع (٤ - ٧) تتحول الى الصورة :

$$mg \sin \theta - f = ma$$

.. وإذا كان الاحتكاك مساويا للصفر فإن $f = 0$ ، منه :

(٤ - ٨)

$$a = g \sin \theta$$

بدون احتكاك

من هذا يتضح أن تسارع الجسم على المستوى المائل لا يعتمد على طبيعة هذا الجسم بشرط عدم وجود احتكاك . وهذا يعنى أن عربة الأطفال ستتحرك الى أسفل على سفح التل بنفس تسارع السيارة اذا كانت قوى الاحتكاك مهملة .

في الحالة الحدية ، عندما تكون $\theta = 0$ ، والأرض مستوية تبين لنا المعادلة (٤ - ٨) أن التسارع يساوى صفرا ، لأن $\sin \theta = 0$. وهذا بالطبع صحيح . من ناحية أخرى ، اذا كانت $\theta = 90^\circ$ ، أى اذا كان المستوى المائل رأسيا ، فإن القالب سوف يسقط رأسيا الى أسفل وان لم يكن هناك احتكاك فإن الجسم سوف يسقط بتسارع الجاذبية g . المعادلة (٤ - ٨) صحيحة أيضا في هذه الحالة لأنه اذا كانت $\theta = 90^\circ$ فإن $\sin \theta = 1$ وبالتالي فإن المعادلة (٤ - ٨) تتحول الى $a = g$.

وعند هذه النقطة يجدر بنا أن ننبهك الى أنه ليس من الضروري عادة أن تحفظ معظم المعادلات المذكورة آنفا عن ظهر قلب .. ربما كانت المعادلة (٤ - ٨) هامة بدرجة كافية لأن تحفظها عن ظهر قلب ، ولكن المعادلات الأخرى يمكن استنباطها بسهولة في أية حالة معينة . بالإضافة الى ذلك قد تؤثر على الجسم قوى أخرى كما يحدث في كثير من المواقف ، وعليه فإن المسألة يجب أن تحل من البداية . وسنرى فيما بعد أن هذا ليس صعبا على الإطلاق .

مثال توضيحي ٤ - ٤ : لندرس الموقف الآتى . يبدأ طفل في عربة الحركة من السكون من قمة تل ارتفاعه 20 ft وطوله 100 ft كما هو مبين في شكل ٤ - ٥ . (١) ما هو تسارع العربة ؟ (٢) ما هي سرعة العربة عند قاعدة التل ؟ (افترض أن قوى الاحتكاك مهملة) .

طريقة الحل : لكي نجيب على هذه الاسئلة لندرس رسم بيان الجسم الحر المبين في الجزء ب من الشكل . لابد أن تترن Y مع $W \cos \theta$. ومن ثم فإن القوة غير المتزنة الوحيدة تؤثر في الاتجاه x وتساوي $W \sin \theta$. وباستخدام قانون نيوتن ، $F = ma$ ، ونجد أن :

$$W \sin \theta = ma$$

$$mg \sin \theta = ma$$

او :

$$a = g \sin \theta$$

لايجاد $\sin \theta$ نتذكر أن تعريف الجيب هو طول الضلع المقابل مقسوما على طول الوتر . وباستخدام المثلث الذي يكونه المستوى المائل نجد من شكل ٤ - ٥ أن :

$$\sin \theta = \frac{20 \text{ ft}}{100 \text{ ft}} = 0.20$$

وحيث أن $g = 32 \text{ ft/s}^2$ فإن التسارع سيصبح :

$$a = (32 \text{ ft/s}^2)(0.20) = 6.4 \text{ ft/s}^2$$

أي أن حركة الطفل منتظمة التسارع ، وعليه فإن معادلات الحركة المذكورة في الفصل الثاني تنطبق على هذه المسألة . المعطيات هي :

$$v_0 = 0 \quad a = 6.4 \text{ ft/s}^2$$

$$s = 100 \text{ ft} \quad v_f = ?$$

المعادلة المناسبة هي :

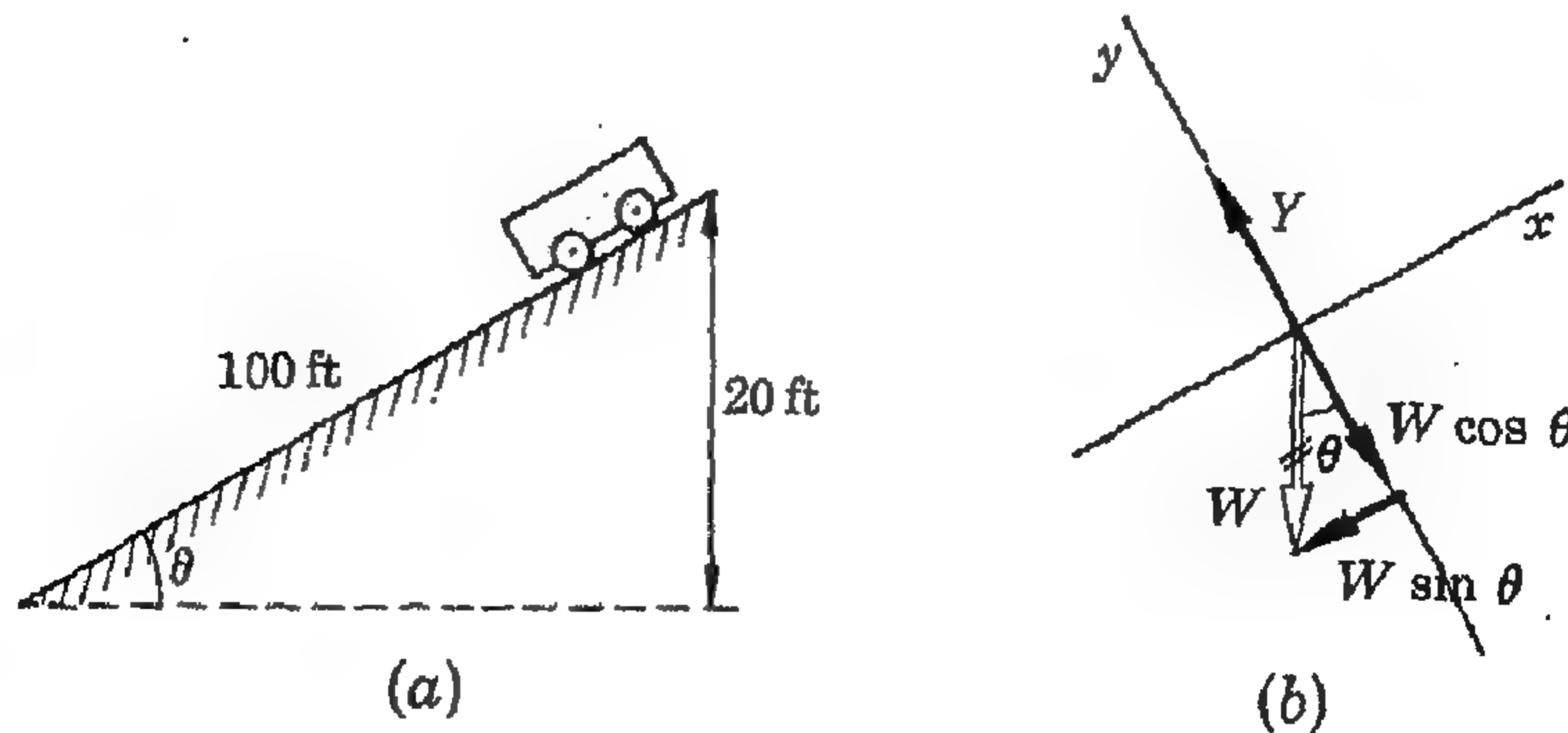
$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

$$v_f^2 = (2)(6.4 \text{ ft/s}^2)(100 \text{ ft})$$

$$v_f = 10\sqrt{12.8} = 36 \text{ ft/s}$$

لاحظ أننا لم نحتاج الى معرفة وزن الطفل والعربة لكي نحل هذه المسألة أما اذا كنا قد افترضنا وجود قوة الاحتكاك فلم يكن ممكنا اختزال الكتلة .

مثال توضيحي ٤ - ٥ : تستطيع سيارة معينة كتلتها 1200 kg أن تتسارع بمعدل 0.50 m/s^2 الى أعلى فوق مستوى مائل يرتفع بمعدل 4.0 m لكل 40 m . ماهي القوة التي يجب أن تؤثر على السيارة والتي تدفعها أثناء صعودها على المستوى المائل باهمال الاحتكاك ؟



شكل (٤ - ٥)
تسبب مركبة الوزن الموازية
للمستوى المائل تسارع العربة
(بدون مقياس رسم)

طريقة الحل : ارجع الى شكل ٤ - ٦ أ ، ب . القوة المطلوبة هي القوة P التي تدفع السيارة الى أعلى فوق المستوى المائل . من الواضح أن القوة غير المتزنة في الاتجاه x هي $P - W \sin \theta$ وحيث أن $W = mg$ ، $m = 1200 \text{ kg}$ ، فان قانون نيوتن يمكن وضعه على الصورة :

$$F = ma$$

$$P - W \sin \theta = ma$$

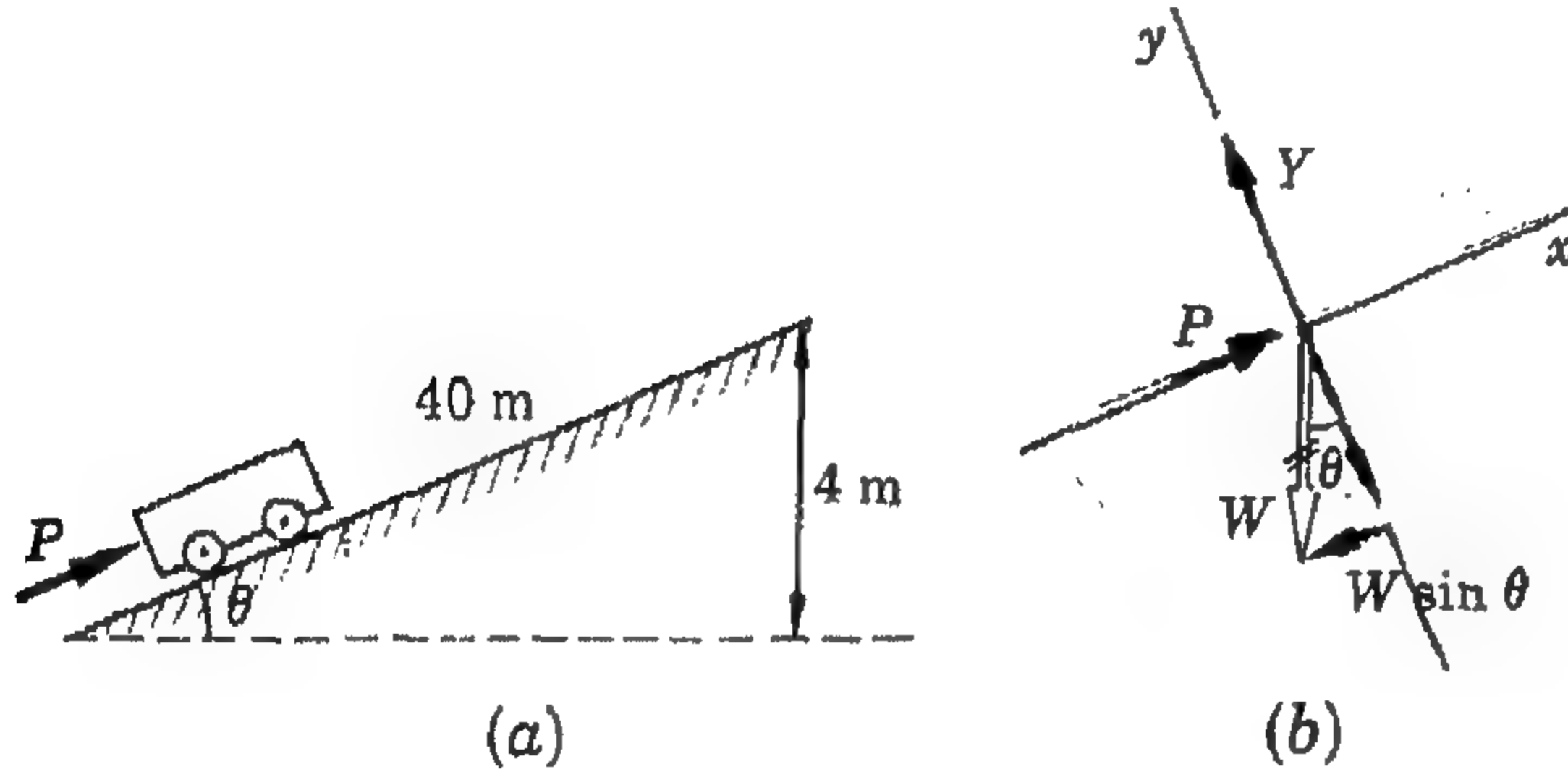
أو :

$$P - (1200 \times 9.8) \left(\frac{4.0}{40} \right) = (1200 \text{ kg})(0.50 \text{ m/s}^2)$$

ومنه :

$$P = 1780 \text{ N}$$

هل يمكنك أن تصف كيف توفر العجلات هذه القوة للسيارة ؟



شكل (٤ - ٦)

تتزن القوة P جزئياً مع مركبة الوزن المؤثرة الى أسفل في اتجاه مواز للمستوى المائل . ينشأ الى أعلى في الاتجاه الموازي للمستوى المائل كنتيجة للجزء غير المتزن من P

مثال توضيحي ٤ - ٦ : يراد سحب قالب كتلته 50 kg الى أعلى على مستوى مائل باستخدام موتور . كما هو موضح في شكل ٤ - ٧ ، وكان معامل الاحتكاك بين القالب والمستوى المائل 0.70 . ماهو الشد في الحبل اذا كان القالب يتحرك بسرعة ثابتة ؟

طريقة الحل : لاحظ هنا أن التسارع يساوى صفراً ، وبناء على ذلك فان القوة غير المتزنة المؤثرة على القالب تساوى صفراً وعليه فان القالب في حالة توازن (يتحرك بسرعة ثابتة) . وحيث أن مجموع القوى في الاتجاه x يساوى صفراً ، يمكننا بالاستعانة بالشكل ٤ - ٧ ب أن نكتب العلاقة التالية :

$$T - f - W \sin \theta = 0$$

وحيث أن $W = mg$ فان :

$$T = f + (50 \times 9.8 \text{ N}) \left(\frac{6}{10} \right)$$

ولكن قوة الاحتكاك تعطى بالعلاقة $f = \mu Y$ وايضا حيث القوى في الاتجاه y لابد أن تكون متزنة $Y = W \cos \theta$ فان :

$$f = (0.70)(50 \times 9.8 \text{ N})(\frac{8}{10})$$

وبالتعويض عن هذه القيمة نحصل على $T \approx 570 \text{ N}$.

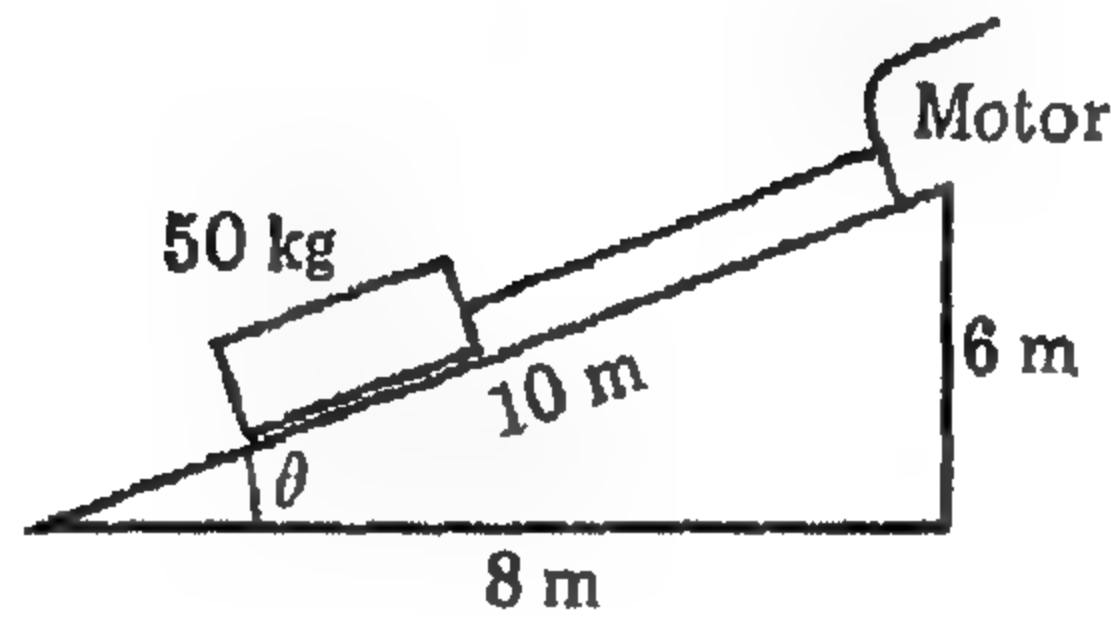
مثال توضيحي ٤ - ٧ : أوجد تسارع المجموعة الموضحة في شكل ٤ - ٨ أ . قوة الاحتكاك المؤثرة على القالب الذي كتلته 5 kg هي 20 N .

طريقة الحل : كما فعلنا في الأمثلة المشابهة في الفصل الأخير يعزل كل جسم ثم نكتب العلاقة $F = ma$ لكل من الجسمين على حدة ، ثم يرسم رسم بيان الجسم الحر كما هو مبين في الجزئين ب و جـ من الشكل ٤ - ٨ . وعند وجود قوى الاحتكاك من الضروري أن نعرف اتجاه الحركة لأن f يجب أن تكون في عكس اتجاه الحركة . وفي هذه الحالة يمكننا أن نقول أن الجسم الذي كتلته 7 kg سوف يسقط . وبأخذ اتجاه الحركة كاتجاه موجب وتطبيق القانون $F = ma$ على الجسمين نحصل على المعادلتين الآتيتين :

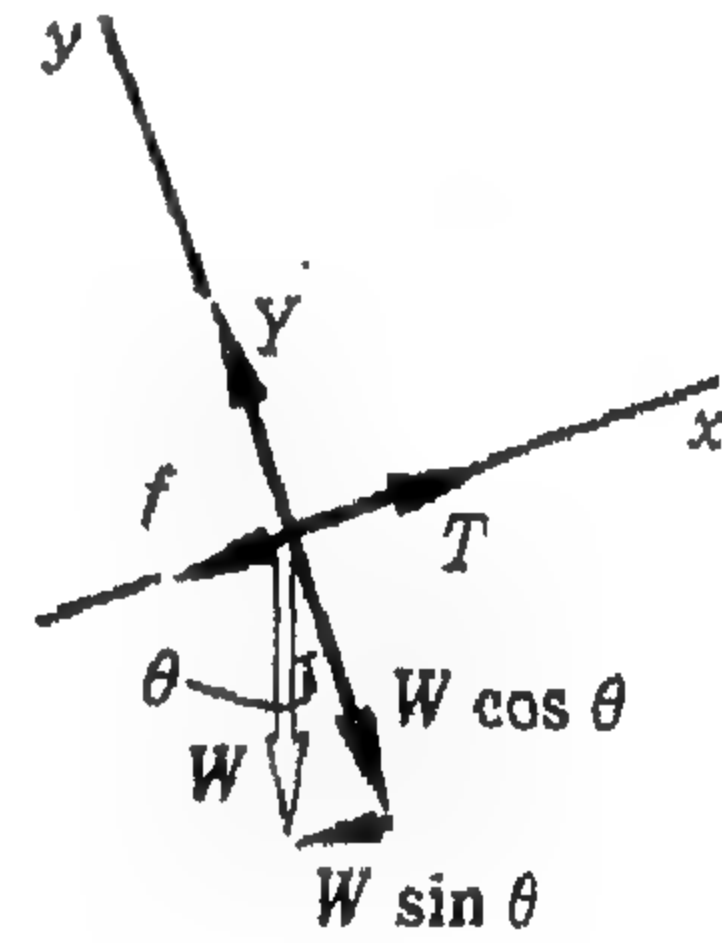
$$\begin{aligned} (7 \times 9.8) - T &= 7a \\ T - 29.4 - 20 &= 5a \end{aligned}$$

شكل (٤ - ٧)

حيث أن القالب يجب أن يتحرك الى أعلى فرق المستوى المائل بسرعة ثابتة فإن الجذب الناتج من الموتور يجب أن يتزن تماما مع مجموع قوة الاحتكاك ومركبة الوزن المؤثرة الى أسفل المستوى المائل .



(أ)



(ب)

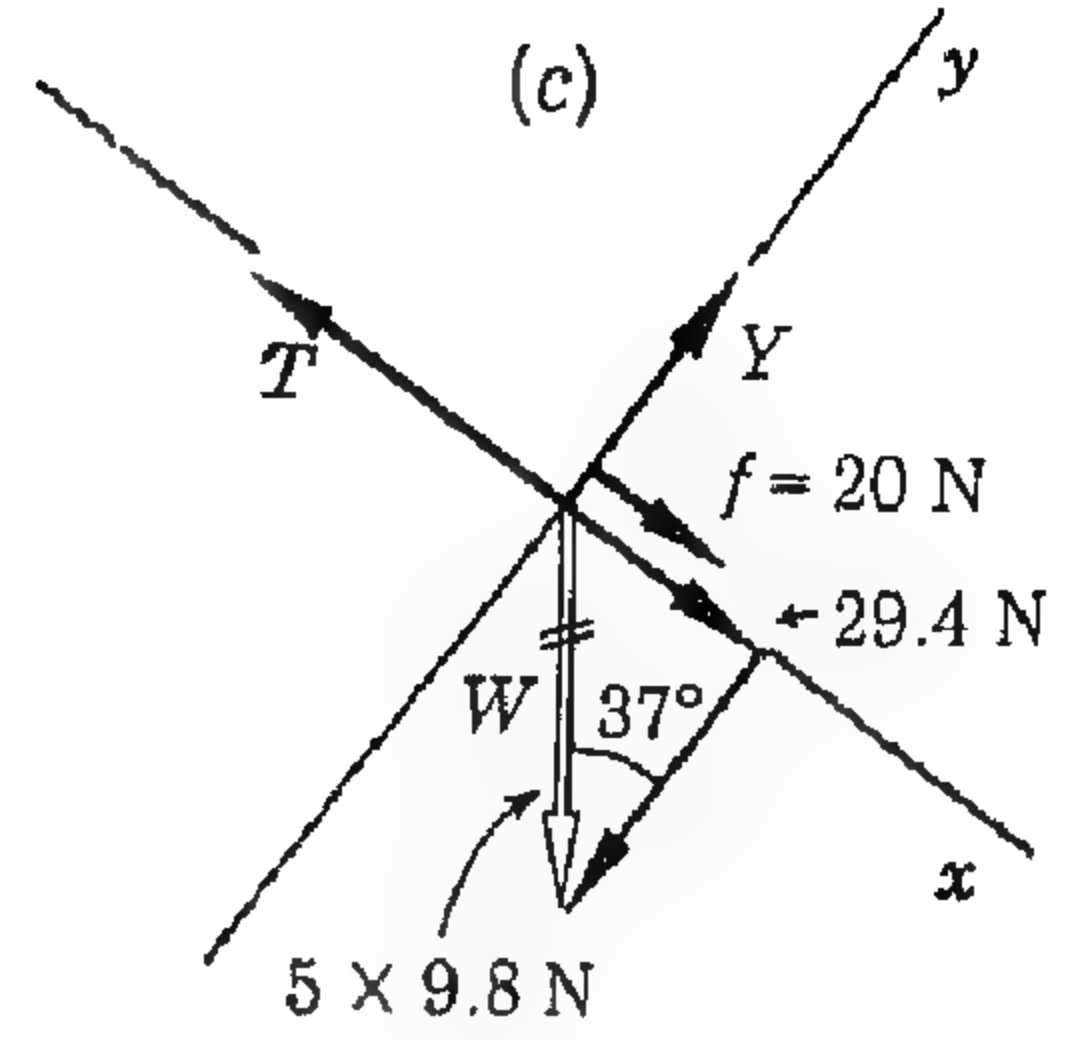
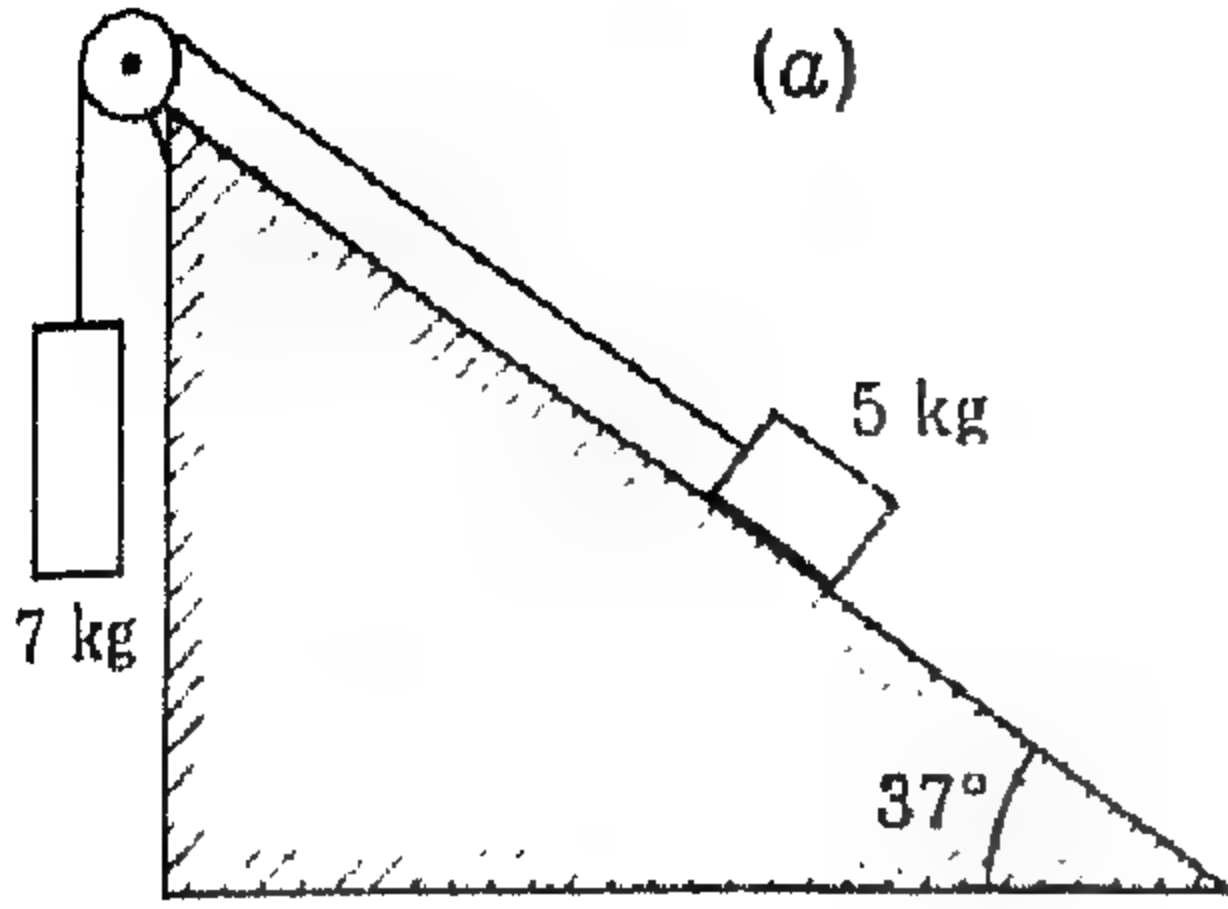
وبجمع هاتين المعادلتين نحصل على :

$$\begin{aligned} 19.2 &= 12a \\ a &= 1.6 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

ن ب عليك الآن التعويض بالوحدات في المعادلات السابقة وإثبات أن وحدات a المذكورة صحيحة .

يمكن إيجاد الشد بالتعويض في المعادلة الثانية لنجد أن :

$$T = 49.4 + 8.0 = 57.4 \text{ N}$$



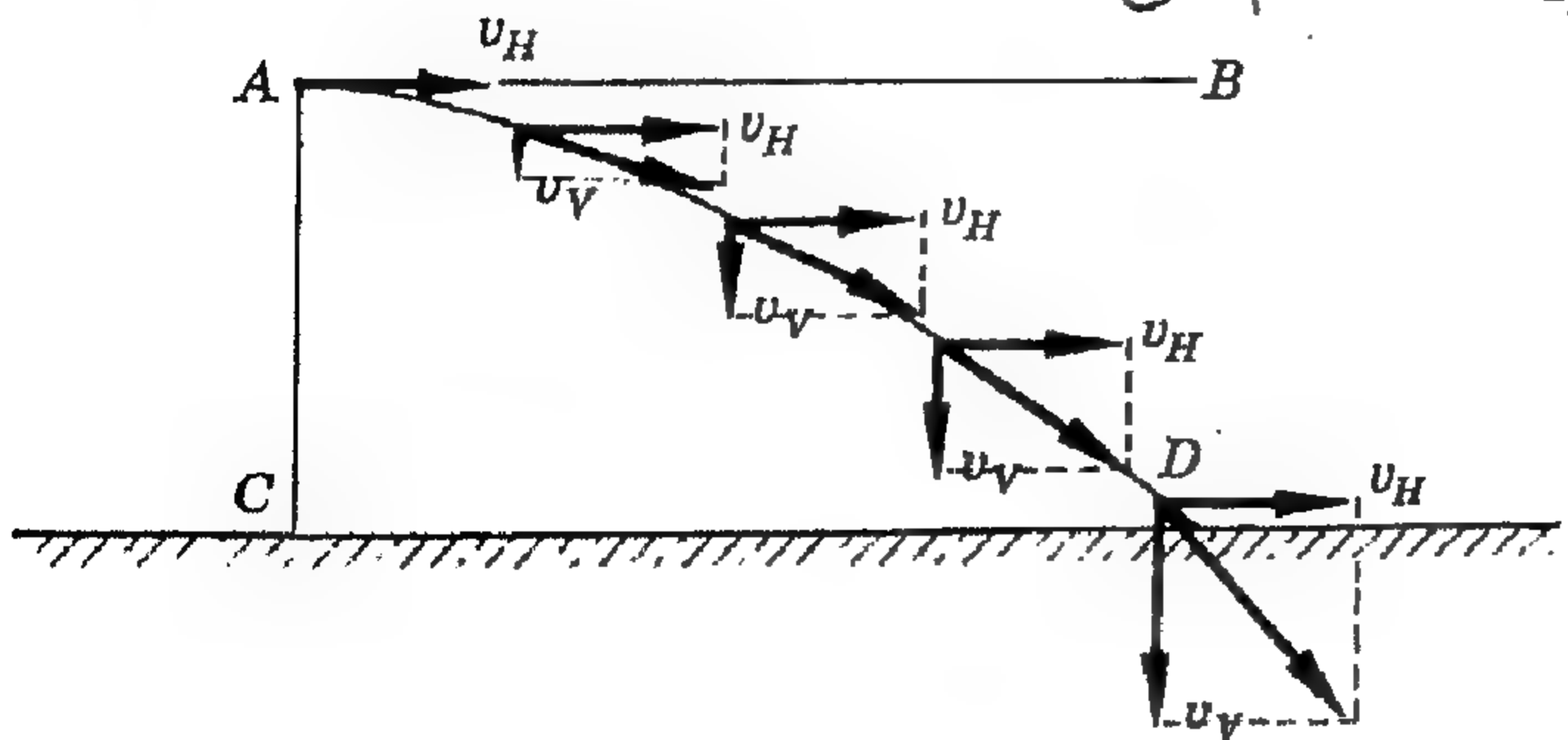
٤ - ٣ حركة المقذوفات

في هذا الجزء سندرس جسم يسقط سقوط طليقا عندما يكون لسرعته مركبة موازية لسطح الأرض . ويجدر بنا أن نوضح أن السقوط الذاتي للأجسام التي درسناها في الفصل الثاني هو حالة خاصة من الحركة التي سندرسها الآن ، ففي ذلك الفصل عالجنا حالة الجسم الذي يتحرك في الاتجاه الرأسى فقط ، ولكن هذه الحركة ليست الحالة العامة .

شكل (٤ - ٨)
الجسم الذى كتلته 7 kg يسقط رأسيا الى أسفل جاذبا الثقل الآخر الى أعلى على المستوى المائل . الشكلان رسمى بيان الجسم الحر للثقلين .

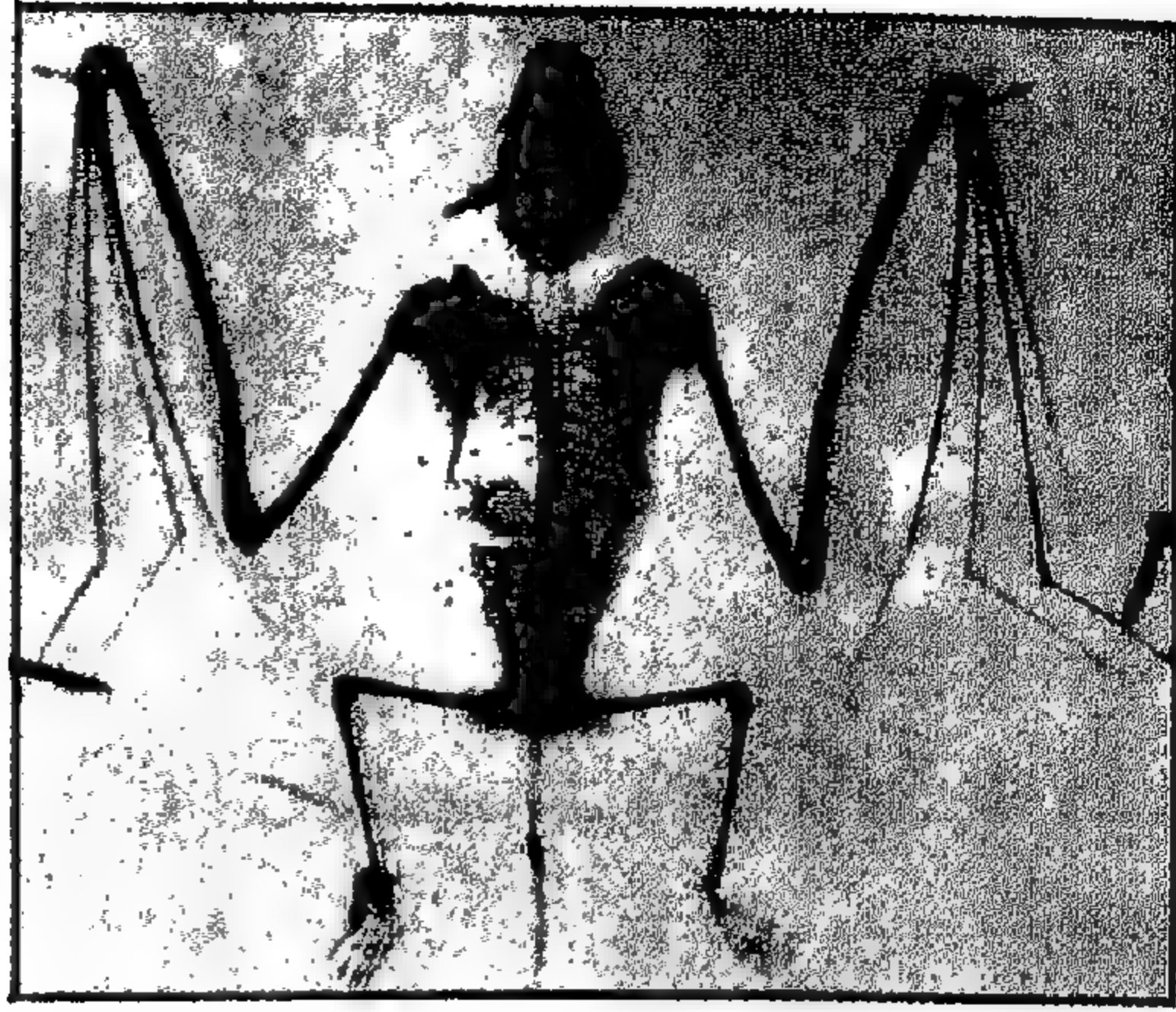
فمثلا عندما يقذف لاعب بسبول (baseball) الكرة الى زميله فانها تفعل شيئين بمجرد أن تترك يد اللاعب . حيث أن الأرض تؤثر على الكرة بقوة تجذبها الى أسفل فانها سوف تتسارع الى أسفل تحت تأثير هذه القوة غير المتزنة . ومع ذلك فإن الكرة سوف تتحرك افقيا في نفس الوقت بسرعة ثابتة معينة . يمكننا فهم ذلك بالاستعانة بالشكل ٤ - ٩ .

لنفرض أن الكرة تترك يد الرامى عند النقطة A وأن سرعتها في تلك اللحظة متجهة بأكملها في الاتجاه الأفقى . لنرمز الى سرعة الكرة في تلك اللحظة بالرمز v_H . طبقا لقانون نيوتن لن يكون للكرة أى تسارع في الاتجاه الأفقى مالم تؤثر عليها قوة متجهة افقيا . ولكن اذا أهملنا الاحتكاك مع الهواء فان القوة الوحيدة التي ستؤثر على الكرة بمجرد أن تتحرر من يد القاذف هي قوة الجاذبية ، ولن تكون هناك أية قوة أفقية مؤثرة على الكرة . لذلك فان السرعة الأفقية ستظل ثابتة ومساوية للسرعة الأفقية الابتدائية v_H الى أن تصطدم بشيء ما .



شكل (٤ - ٩)
السرعة الأفقية الابتدائية للكرة v_H لا تتغير . وعندما تتحرك الكرة بهذه السرعة الى اليمين فانها تسقط أيضا تحت تأثير الجاذبية الأرضية كما هو موضح بالمتجهات التي تمثل المركبة الرأسية للسرعة .
لاحظ أن $v = \sqrt{v_H^2 + v_V^2}$ وأنها مماسة لمسار المقذوف .

صورة بالأشعة السينية
لخفاش تم التقاطها باستخدام
الجهاز الموضح في شكل
٢٧ - ١٥ ب (هيلويت -
باكارد)



اكتشاف الأشعة السينية

اكتشفت كثير من قوانين الفيزياء بتفسير نتائج التجارب المصممة بعناية لتعيين هذه القوانين . وينطبق هذا على اكتشاف جاليليو لقانون الاجسام الساقطة ، كما تنتمي قوانين نيوتن أيضا الى نفس هذا النوع العام . ومع ذلك فان بعض الظروف المعملية الدقيقة وغير المتوقعة تؤدي أحيانا إلى اكتشاف ظاهرة هامة في الفيزياء . وهذا هو ما حدث عندما اكتشف ويلهلم كونراد رونتجن (١٨٤٥ - ١٩٢٣) الأشعة السينية .

لاجراء تجارب التفريغ أو الشرر على الفلطية ، وضع رونتجن فرق جهد قدره بضعة آلاف من الفولطيات بين قطبين كهربائيين موجودين في نهايتي أنبوب مفرغ تفريغا جزئيا . وتحت هذه الظروف لاحظ رونتجن تكون تفريغ أو وهج يشبه كثيرا ذلك الوهج المشاهد في اشارات النيون . ومع ذلك فاذا انقص ضغط الغاز في الأنبوب بدرجة كافية فان الوهج يتوقف تقريبا . وعند اجراء التجارب باستعمال أنبوب مفرغ تفريغا عاليا في معمله المظلم عام ١٨٩٥ لاحظ أن ستارا فلوريا قريبا (يشبه كثيرا الستار الموجود في نهاية أنابيب التليفزيون الحالية) يتوهج أيضا في الظلام . بتحريك الستار في الغرفة استطاع أن يثبت أن الضوء المنبعث من الستار الفلورى كان ناتجا من شيء ما يحدث في أنبوب التفريغ . وحيث أنه كان من الممكن وضع غطاء محكم ضوئيا على الأنبوب بدون أن يؤثر كثيرا على وهج الستار ، كان من الواضح أن الوهج الفلورى كان مسببا بشيء آخر غير الضوء المنبعث من أنبوب التفريغ . وقد سمي رونتجن هذا الاشعاع المجهول الذى ينقطع على الستار والمنبعث من الأنبوب بالأشعة السينية .

أجرى رونتجن كثيرا من التجارب على الأشعة المنبعثة من أنبوب التفريغ ووجد أنها عالية النفاذية وتستطيع أن تنفذ حتى خلال كتاب سميك . كما وجد كذلك أن الفلزات الثقيلة والعظام (ضمن مواد أخرى) غير شفافة تقريبا لهذه الأشعة مثل بعض المواد كالخشب والورق . بالإضافة الى ذلك استطاع رونتجن أيضا تكوين الظلال باستخدام هذه الأشعة ، فقد تمكن من تكوين ظلال تبين عظام يد زوجته والخاتم الذى تضعه في أصبعها . ونظرا لقدرة هذه الأشعة على تكوين الظلال ترك رونتجن الاحتمال مفتوحا لأن نكون هذه الأشعة ضوءا ذا طول موجى قصير . ومع ذلك فقد كان ممانعا لأن يقرر ذلك كحقيقة لأن هذه الأشعة ، بعكس الضوء ، لا تنكسر انكسارا محسوسا عند مرورها من الهواء الى الماء .

وكما سنرى في الفصول اللاحقة فان الأشعة السينية التى اكتشفها رونتجن تشبه بالفعل موجات الضوء ولكن طولها الموجى أقصر كثيرا . ولسوء الحظ فان الأشعة السينية ، كما نعلم الآن ، تدمر الأنسجة الآدمية وتسبب حروقا شديدة عند التعرض المفرط لها . وحتى اذا لم تحدث هذه الأشعة حروقا مرئية فان تدميرها آخر قد يكون موجودا . وقد عانى كثير من الباحثين الأوائل في مجال الأشعة السينية تدهورا في صحتهم ومات بعضهم بالفعل نتيجة لجهلهم للخواص الضارة لهذه الأشعة المفهومة قديما .

ويجب أن يكون واضحاً من ذلك أن الحركة الأفقية للكرة بسيطة للغاية ، فإن الكرة تتحرك بسرعة ثابتة تساوي المركبة الأفقية للسرعة وهي v_H إلى أن تصطدم بشيء ما . يمكننا إذن أن نكتب المعطيات التالية بالنسبة للحركة الأفقية (حيث أن السرعة الابتدائية v_0 تساوي السرعة النهائية v_f ومتوسط السرعة \bar{v}) :

$$\begin{aligned} v_0 &= v_f = \bar{v} = v_H & \text{للحركة الأفقية :} \\ a &= 0 & s = \bar{v}t = v_H t \end{aligned}$$

أما الحركة الرأسية للكرة فإنها ليست معقدة كثيراً ، فإن الكرة سوف تتسارع إلى أسفل تحت تأثير قوة الجاذبية ، وعليه فإن $a = g$. وهذه الحركة الرأسية هي تماماً نفس الحركة التي ناقشناها في الفصل الثاني بالنسبة للسقوط الذاتي للأجسام ، وعليه فإن حل مسألة الحركة الرأسية ليس جديداً علينا ويمكننا بالتالي حلها بدون أية صعوبة .

تعتمد طريقتنا إذن على أن الحركة الحرة لكرة أو رصاصة أو أى مقذوف آخر تتكون من حركتين منفصلتين . الأولى هي الحركة الأفقية بسرعة ثابتة وهي مسألة بسيطة جداً . أما الحركة الثانية فهي الحركة الرأسية وهي تماثل تماماً حركة السقوط الذاتي لجسم رأسياً في خط مستقيم . وسنحسب كل جزء من مسألة حركة المقذوف على حدة ، ثم ندمج نتيجتنا حل المسألتين المنفصلتين للحصول على الإجابة المطلوبة . ويتم ذلك في الحقيقة بحساب المركبتين الأفقية v_H والرأسية v_V لسرعة المقذوف ثم يوجد مقدار السرعة المحصلة باستخدام الطريقة المعتادة لجمع المتجهات المتعامدة $v = \sqrt{v_H^2 + v_V^2}$ ويمكن توضيح هذه الطريقة بالمثل التالي .

مثال توضيحي ٤ - ٨ : لندرس الموقف الموضح في شكل ٤ - ٩ . لنفرض أن الكرة تترك يد القاذف لتسير بسرعة أفقية قدرها 15 m/s ولنفرض أن الكرة كانت على ارتفاع 2.0 m فوق سطح الأرض عند هذه اللحظة . في أى مكان سوف تصطدم الكرة بالأرض ؟ (أى على أى بعد تقع النقطة D بالنسبة إلى النقطة C في شكل ٤ - ٩) .

طريقة الحل : نبدأ الحل بتقسيم المسألة إلى قسمين :

وحيث أن زمن الطيران ، أى الزمن اللازم للسقوط على الأرض قد وجد من مسألة الحركة الرأسية ، فإن هذه النتيجة يمكن استخدامها في مسألة الحركة الأفقية . إذن :

$$s_H = (15 \text{ m/s})(0.64 \text{ s}) = 9.6 \text{ m}$$

مسألة الحركة الرأسية (الاتجاه الموجب الى أسفل) مسألة الحركة الأفقية

$$v_0 = v = \bar{v} = 15 \text{ m/s}$$

$$s_H = \bar{v} = 15t$$

لايجاد t يجب حل المسألة الرأسية

$$v_0 = 0$$

$$a = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$s_V = 2.0 \text{ m}$$

To find t , we use

$$s_V = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$2.0 = 4.9 t^2$$

$$t = 0.64 \text{ s}$$

وباسلوب آخر يمكننا القول أن الكرة تقطع مسافة 9.6 m فقط قبل أن يسبب جذب الجاذبية الأرضية سقوطها على الأرض . وفي الحقيقة فاننا نقذف الكرة عادة الى أعلى قليلاً* اذا أردنا أن تقطع الكرة أية مسافة كبيرة . فاذا كان للكرة مركبة ابتدائية للسرعة متجهة الى أعلى فانها ستأخذ وقتاً أطول للسقوط على الأرض وبالتالي سيكون لديها وقت أطول لكي تتحرك في الاتجاه الأفقى .

مثال توضيحي ٤ - ٩ : قذفت كرة بسرعة ابتدائية قدرها 30 ft/s بزاوية قدرها 37° فوق الأفقى ، وتركت يد القاذف من ارتفاع قدره 40 ft فوق مستوى الأرض ومن بعد قدره 15 ft من حائط كما هو مبين في شكل ٤ - ١٠ . (١) على أى ارتفاع من سطح الأرض ستصطدم الكرة بالحائط ؟ (٢) هل ستكون الكرة متحركة الى أعلى قبل الاصطدام مباشرة أو أنها ستكون متحركة في طريقها الى أسفل ؟

طريقة الحل : لندرس رحلة الكرة من نقطة البداية الى الحائط . بالنسبة للجزء ١ :
الجزء ٢ : لنستمر في معالجة الجزء الرأسى من المسألة ونوجد المركبة الرأسية لسرعة الكرة قبل اصطدامها بالحائط مباشرة . لدينا :

$$v = v_0 + at = 18 - (32)(\frac{5}{8}) = 18 - 20 = -2 \text{ ft/s}$$

مسألة الحركة الرأسية (الاتجاه الموجب الى أعلى) مسألة الحركة الأفقية

$$v_0 = v = \bar{v} = 24 \text{ ft/s}$$

$$s = 15 \text{ ft}$$

$$= \bar{v}t$$

$$15 = 24t$$

$$t = \frac{5}{8} \text{ s}$$

نستخدم الآن هذه النتيجة في مسألة الحركة الرأسية .

$$v_0 = 18 \text{ ft/s}$$

$$t = \frac{5}{8} \text{ s}$$

$$a = -32 \text{ ft/s}^2$$

$$s = ?$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

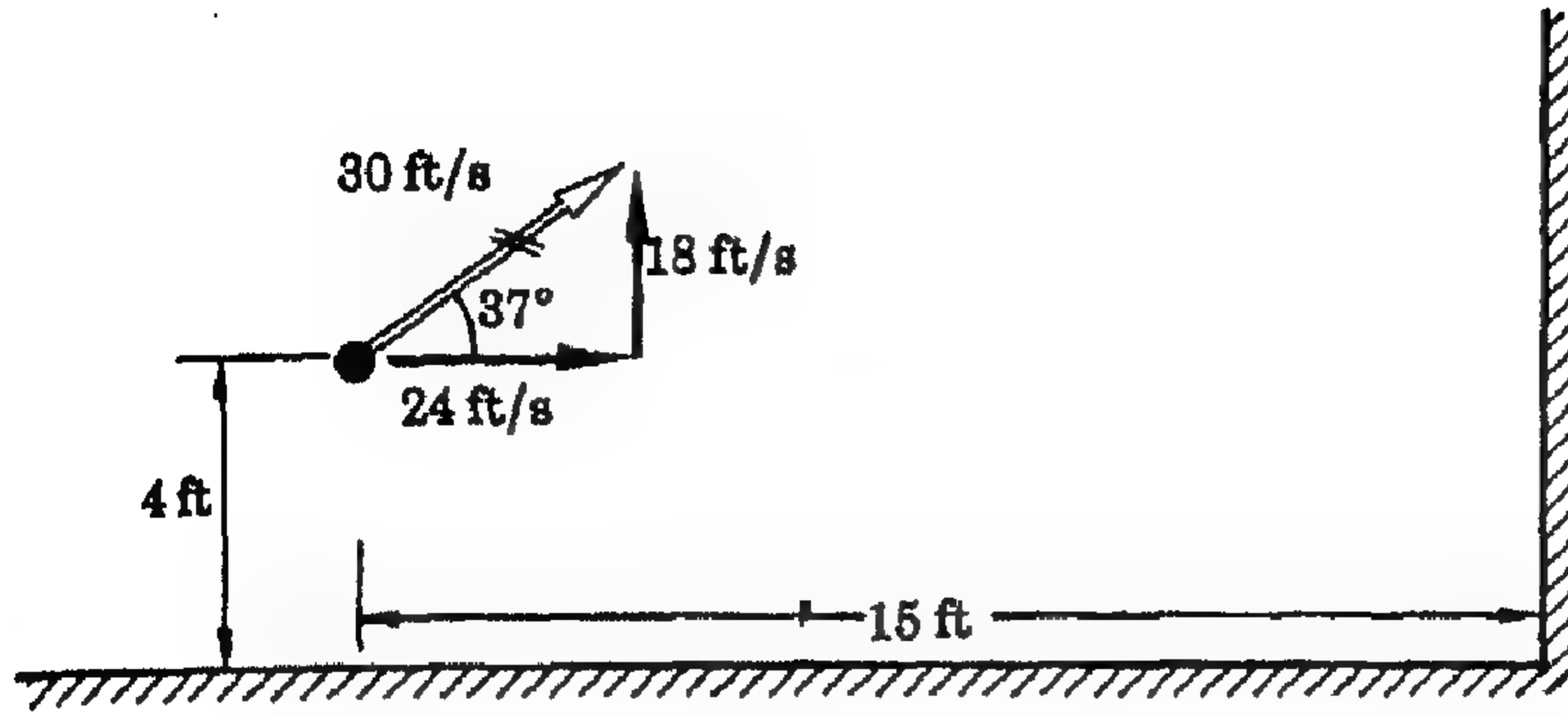
$$= (18)(\frac{5}{8}) - (16)(\frac{5}{8})^2$$

$$= 11.2 - 6.2$$

$$= 5.0 \text{ ft فوق نقطة البداية}$$

وحيث أننا قد اخترنا الاتجاه الى أعلى كاتجاه موجب ، فان السرعة السالبة تعنى سرعة الى أسفل . وعليه فان الكرة تكون في طريقها الى أسفل عند الاصطدام .

* ولكن ليس بزاوية 45° من الأفقى . لماذا ؟



شكل (٤ - ١٠)
في أى مكان تصطدم الكرة
بالجائط ؟ هل ستكون
متحركة الى أعلى عند لحظة
الاصطدام ، أو أنها ستكون
في طريقها الى أسفل ؟

السرعة الكلية للكرة قبل الاصطدام مباشرة تتكون من المركبة الرأسية الى أسفل
وهي 2 ft/s والمركبة الأفقية 24 ft/s لايجاد مقدار السرعة عند هذه النقطة يمكن جمع
هاتين المركبتين بالطريقة المعتادة . سنجد عندئذ أن مقدار السرعة الكلية هو
 $\sqrt{(24)^2 + 2^2} \text{ ft/s}$

ملخص :

كل قطعة من الكتلة في الكون تجذب كل القطع الأخرى من الكتلة . اذا كانت كتلتا كرتين منفصلتين هما m_1 و m_2 فان القوة
الجاذبة التي تؤثر بها كل منهما على الأخرى تعطى بقانون نيوتن للجاذبية :

$$F = G \left(\frac{m_1 m_2}{r^2} \right)$$

حيث G ثابت من ثوابت الطبيعة ويساوي $6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ و r هي المسافة بين مركزي الكرتين . تنطبق هذه العلاقة أيضا على
لكتل غير الكروية التي تعتبر صغيرة بالمقارنة بمسافة الانفصال r .

يمكن إيجاد تسارع الجاذبية g من العلاقة $F = ma$ من قانون نيوتن للجاذبية . بفرض أن الأرض عبارة عن كرة فان كتلة خارج الأرض
تقع على مسافة r من مركز الأرض سوف تسقط بتسارع قدره $g = GM_{\text{earth}}/r^2$ حيث M_{earth} كتلة الأرض . ينطبق تعبير مشابه على
السقوط الذاتي على القمر وذلك باستبدال M_{earth} بكتلة القمر وجد أن g_{moon} تساوي حوالى سدس قيمة g_{earth} .

عند دراسة الحركة على مستوى مائل يعالج الموقف بدلالة مركبات الحركة . يؤخذ المحور x موازيا لسطح المستوى المائل بينما يؤخذ المحور y
عموديا على السطح المائل .

تحلل حركة المقذوف ، بدون احتكاك ، بدلالة مركبات الحركة . التسارع يساوي صفرا بالنسبة للحركة الأفقية الموازية لسطح الأرض .
كنتيجة لذلك نجد أن $v_0 = v_r = v_H$ وتؤول معادلات الحركة الخمس الى المعادلة $v = v_H$. تعالج المركبة الرأسية للحركة معالجة مستقلة
بنفس الطريقة التي تستخدم عند غياب الحركة الأفقية .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

- ١ - كتابة المعادلة التي تعبر عن قانون نيوتن للجاذبية . شرح كل رمز بالاستعانة بالرسم البياني . ذكر شروط تطبيق المعادلة .
- ٢ - إيجاد قوة الجذب التي تؤثر بها كرة على أخرى بمعلومية G ، r ، m_1 ، m_2 . تكرار ذلك في حالة كتلتين صغيرتين (كتلتين نقطيتين)
بأى شكل بشرط أن تكون r أكبر كثيرا من أبعاد النقطتين .
- ٣ - حساب تسارع الجاذبية لأي كوكب كبير بشرط معرفة كتلة الكوكب ونصف قطره . افترض أيضا أن G معلومة .

- تحليل القوى المؤثرة على جسم موضوع على مستوى مائل الى مركبتين احدهما موازية لسطح المستوى المائل والأخرى متعامدة معه .
وضيح أى مركبة من مركبات القوة (القوى) هى التى تسبب انزلاق الجسم الى أسفل على المستوى المائل .
- إيجاد قوة الاحتكاك التى تعوق حركة جسم على مستوى مائل بمعلومية θ ، μ ، m . تكرار ذلك فى حالة ما اذا كانت قوة معلومة مؤثرة على الجسم تعوق أو تساعد الحركة .
- ٦ - حساب تسارع جسم يتحرك الى أعلى أو الى أسفل على مستوى مائل عندما تكون القوى المؤثرة على الجسم معلومة .
وبالمثل ، إيجاد القوى المجهولة اذا كان التسارع وجميع القوى المؤثرة على الجسم معلومة عدا واحدة .
- ٧ - تحليل حركة المجموعات المشابهة لتلك المجموعة الموضحة فى المثال التوضيحي ٤ - ٧ .
- ٨ - إيجاد المسافة الأفقية التى يقطعها مقذوف طلق بزاوية معلومة وسرعة معلومة من ارتفاع معين من سطح الأرض .
- ٩ - حساب ارتفاع نقطة اصطدام مقذوف بحائط بعيد اذا كانت السرعة الابتدائية وموضع المقذوف الابتدائي معلومين .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

قانون الجاذبية العام لنيوتن

يمكن استخدام قانون الجاذبية لاشتقاق نتائج جاليليو المتعلقة بتسارع الجاذبية g .

أخذ مركبتى وزن جسم ما فى الاتجاه الموازى لسطح مستوى مائل والاتجاه العمودى عليه .

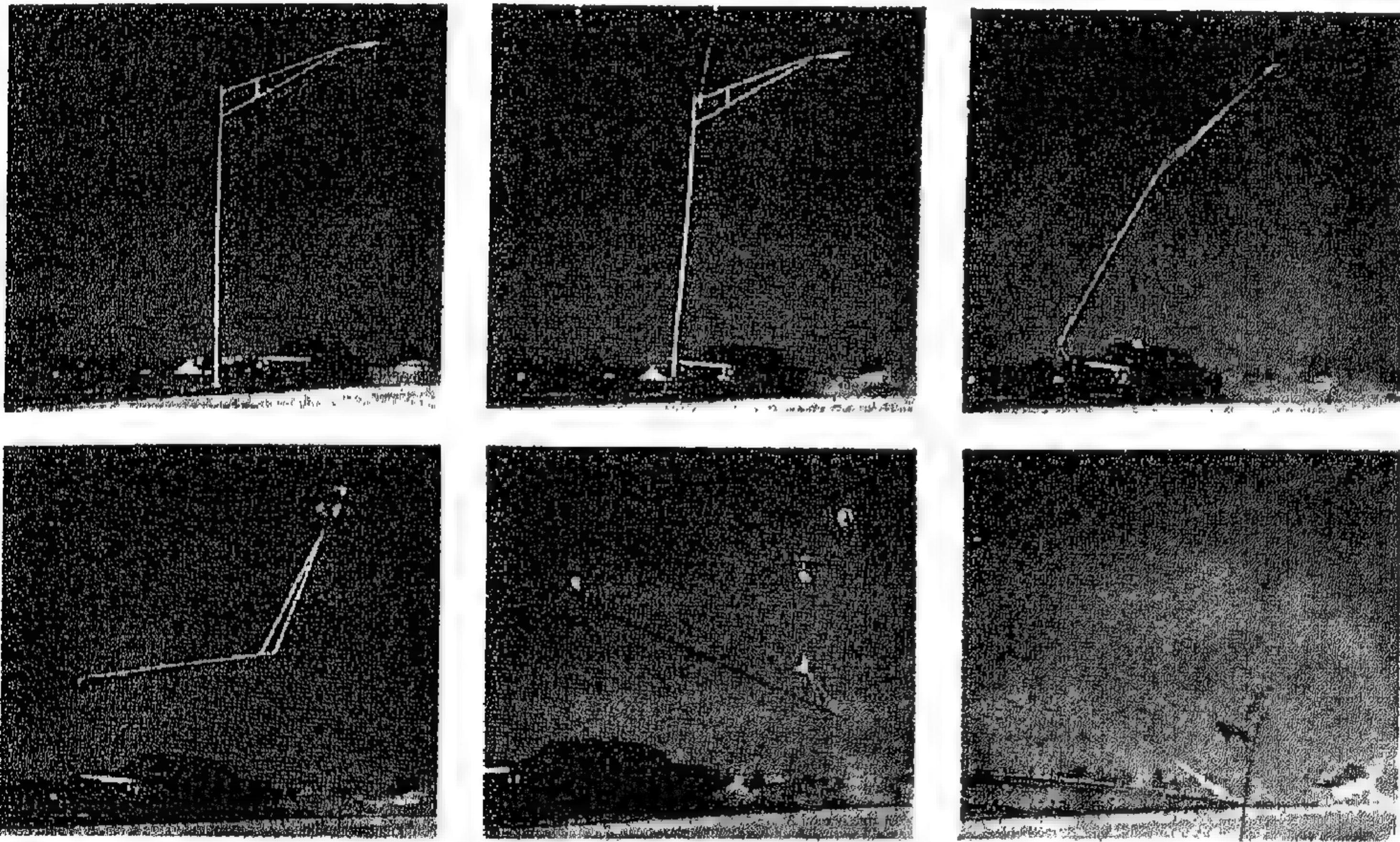
تتكون حركة المقذوف من حركتين منفصلتين تحدثان آنيا فى الحركة الأفقية لمقذوف :

$$\vec{v} = v_0 = v_f \quad \text{و} \quad a = 0$$

أسئلة وتخمينات

- ١ - يقترح أن مستعمرة فضائية قد تكونت على أحد الكويكبات السيارة فى نظامنا الشمسى . ومن المعروف أن كتل هذه الكويكبات تمثل فقط كسرا صغيرا من كتلة القمر . كيف يمكن أن تتغير حياة سكان هذه المستعمرة بسبب تأثيرات الجاذبية ؟
- ٢ - لنفرض أن الحجم الهندسى للشمس هو حجمها الحالى ولكن كتلتها أكبر مائة مرة من كتلتها الحالية . ولأسباب سنذكرها فى الفصول القادمة يجب أن يتغير جوها عن جونا حاليا ، ولكن يمكنك أن تفترض فى هذه المناقشة أن الجو لا يختلف عن جونا وأن هناك مخلوقات آدمية صغيرة موجودة عليها . كيف يمكن أن تختلف أجسام هذه المخلوقات عن أجسامنا نحن ؟
- ٣ - عندما تركل بحذائك كوما من التراب الجاف الدقيق فإن التراب يتطاير فى جميع الاتجاهات . اشرح لماذا يكون هذا العمل أكثر اثارة على القمر عنه على الأرض .
- ٤ - يقوم المتحمسون للطائرات احيانا ببعض الحركات لاثهار مهاراتهم . واحد من هذه الحركات هى اسقاط كيس مليء بالرمل فى مركز دائرة على الأرض بالضبط أثناء طيرانهم على ارتفاع معين وبسرعة معينة . ماهى الصعوبة فى ذلك ؟ ألا يمكنهم اسقاط الكيس عندما يكونون فوق الدائرة مباشرة ؟
- ٥ - يجب أن يكون الوالدان مستعدان لأى شئ تقريبا . لنفرض أن طفلا صغيرا يريد أن يعرف بأى سرعة يمكن للمقلع أن يقذف حجرا . ابتكر طريقة لمعرفة ذلك بفرض أن لديك مسطرة فقط .
- ٦ - اذا أردت أن تصيب جسما ساكنا بعيدا ببندقية فانك لاتوجه البندقية بحيث يقع الجسم على خط مستقيم واحد مع فتحة ماسورة البندقية . كيف توجه البندقية ؟

- ٧ - الى أى ارتفاع يمكنك أن تقذف كرة يسبول على القمر ؟ وإلى أى ارتفاع تقريبا يمكنك أن تقفز ؟ وإلى أية مسافة تقريبا يمكنك أن تقذف ربح دولار ؟
- ٨ - بالرغم من أن قطر كوكب نبتون أكبر من قطر الأرض بـ أربع مرات تقريبا فإن تسارع الجاذبية على نبتون وعلى الأرض متساويان . ماذا يمكنك أن تستنتج عن نبتون من هذه المعلومات ؟
- ٩ - كلما زادت سرعة قذفتك لحجر في اتجاه مواز للأرض كلما سار الحجر مسافة أطول . اشرح مايمكن أن يحدث للحجر اذا قدته بسرعة كبيرة في اتجاه مواز لسطح القمر . افترض أنك تستطيع أن تقذفه بسرعة عالية جدا .
- ١٠ - لنفرض أنك تريد أن ترفع صندوقا ثقيلًا جدا الى ظهر شاحنة ، وكان الصندوق أثقل من أن تستطيع رفعه . اشرح لماذا يمكنك أن ترفعه الى ظهر الشاحنة بزحلقته على لوح يعمل كمستوى مائل بالرغم من أنه أثقل من أن تستطيع حمله .
- ١١ - كرتان كتلة كل منهما 100 g معلقتان من طرفي خيطين جنبًا الى جنب . فإذا كان طول الخيطين 2 m وكانت المسافة بين مركزي الكرتين 10 m ، اعط تقديرًا تقريبيًا لزاوية ميل الخيطين على الرأسى إذا أمكن إهمال جميع التأثيرات عدا تأثير الجاذبية .
- ١٢ - يمثل الشكل م ٤ - ١ مجموعة متتالية من الصور التقطت عند اصطدام سيارة بعمود مصباح الشارع مصنوع من الألومنيوم ومن النوع المنفصل . لماذا يقلل العمود من هذا النوع الدمار الذى يحدث للسيارة ؟ قدر سرعة السيارة عند لحظة التصادم . تفصل بين اللقطات فترات زمنية متساوية . (ق)

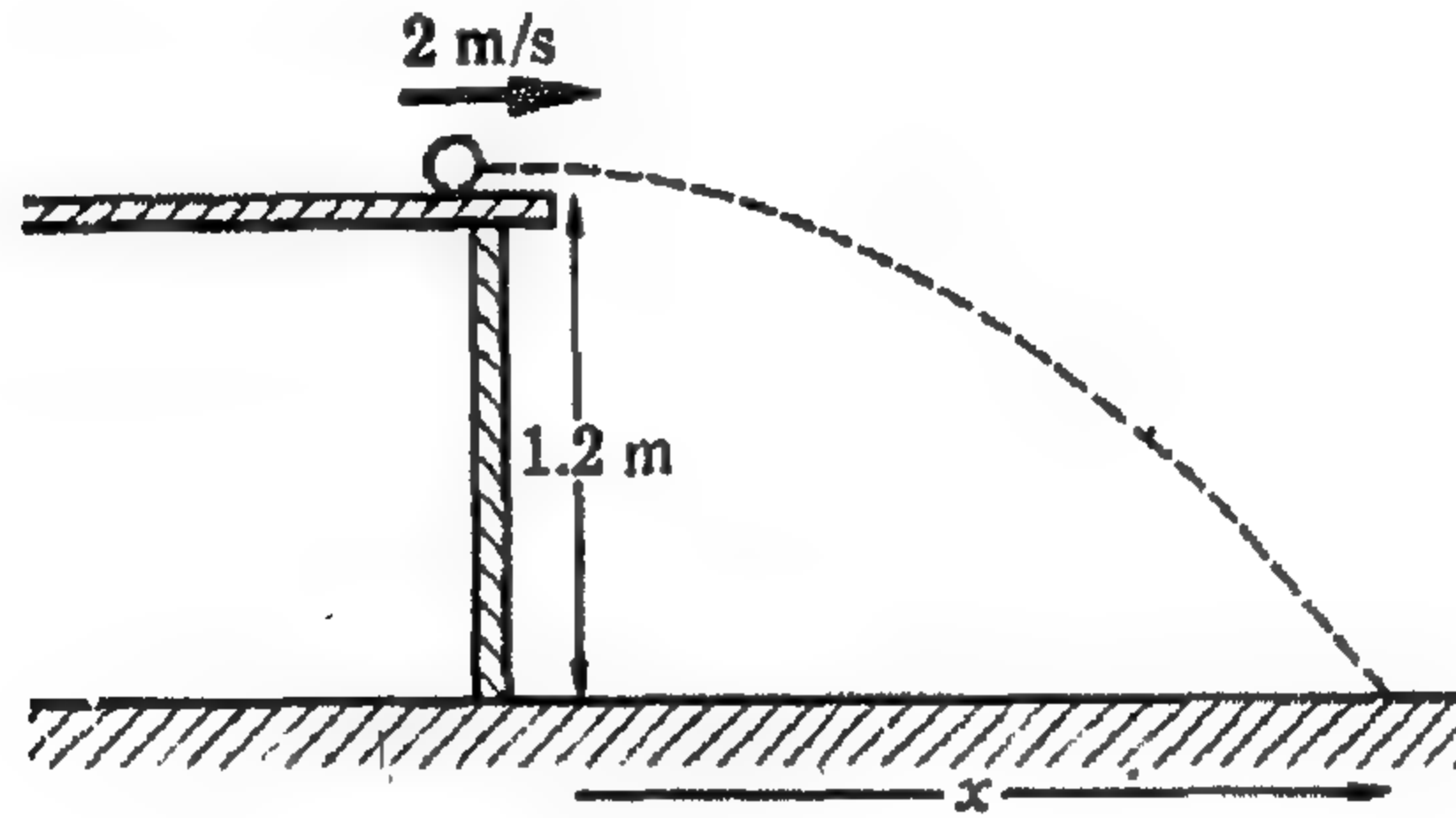


الشكل (م ٤ - ١)

مسائل

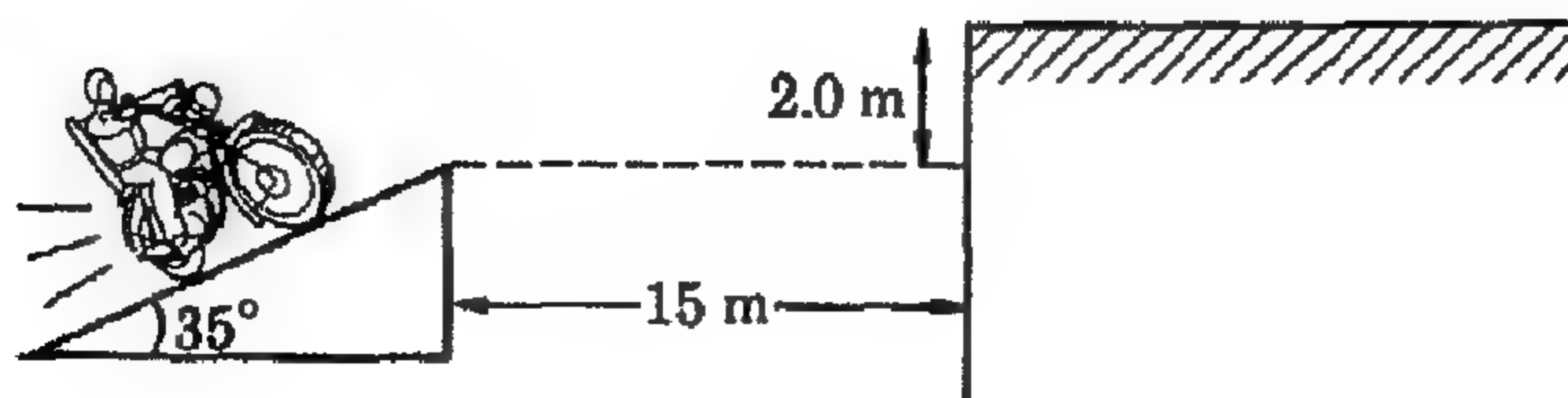
- ١ - النيوترون جسيم غير مشحون كتلته $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ونصف قطره في حدود 10^{-15} m . أوجد التجاذب الثقالي بين نيوترونين المسافة بين مركزيهما 10^{-12} m . قارن هذه القوة بوزن النيوترون على الأرض .
- ٢ - قطعتا عملة معدنيتان كتلة كل منهما m موضوعتان على منضدة والبعد بينهما 50 cm . (أ) أوجد الجذب الثقالي (بدلالة m) لكل قطعة على الأخرى . (ب) دفعت إحدى القطعتان تجاه الأخرى . ماهو معامل الاحتكاك بين قطعة العملة والمنضدة اللازم لكي تستمر هذه القطعة في الحركة ؟ افترض أن $m = 10 \text{ g}$ في الجزء (ب) .
- ٣ - قارن جذب الجاذبية الأرضية لسفينة فضاء على سطح الأرض بالتجاذب الثقالي اذا كانت السفينة تدور على بعد 1000 km من سطح الأرض . (نصف قطر الأرض 3900 mi أو 6370 km) .

- ٤ - كتلة الكوكب جوبيتر تساوي 314 ضعفا لكتلة الأرض ، بينما نصف قطره 11.3 ضعفا لنصف قطر الأرض . أوجد تسارع الجاذبية على جوبيتر .
- ٥ - يراد دفع سيارة وزنها 3600 lb الى أعلى على تل يميل بزاوية قدرها 8° على الأفقى . ما قيمة أقل قوة دفع تلزم لذلك اذا كانت قوى الاحتكاك مهملة ؟
- ٦ - حرر طفل فرامل سيارة عندما كانت تقف على تل زاوية ميله 11.5° (يعامل التل كمستوى يميل بزاوية قدرها 11.5° على الأفقى) ما هو تسارع السيارة وماسرعة حركتها بعد 10 s ؟ (اهل الاحتكاك واستعمل نظام الوحدات SI) .
- ٧ - فصل سائق موتور سيارته عندما كانت تتحرك الى أعلى على مستوى مائل زاوية ميله 15° بسرعة قدرها 20 m/s ما هي المسافة التي سوف تقطعها السيارة على المستوى المائل اذا كانت قوى الاحتكاك مهملة ؟
- ٨ - اذا كان وزن السيارة في المسألة ٧ هو 1400 kg وكانت المسافة التي قطعتها السيارة قبل التوقف هي 30 m ، ما هو متوسط قوة الاحتكاك (بفرض أنه ثابت) التي أوقفتها ؟
- ٩ - اذا كان وزن السيارة في المسألة ٦ هو 2400 lb وكانت سرعتها بعد مرور 10 s هي 9.0 ft/s ، فما هي قوة الاحتكاك التي تعوق حركة السيارة ؟



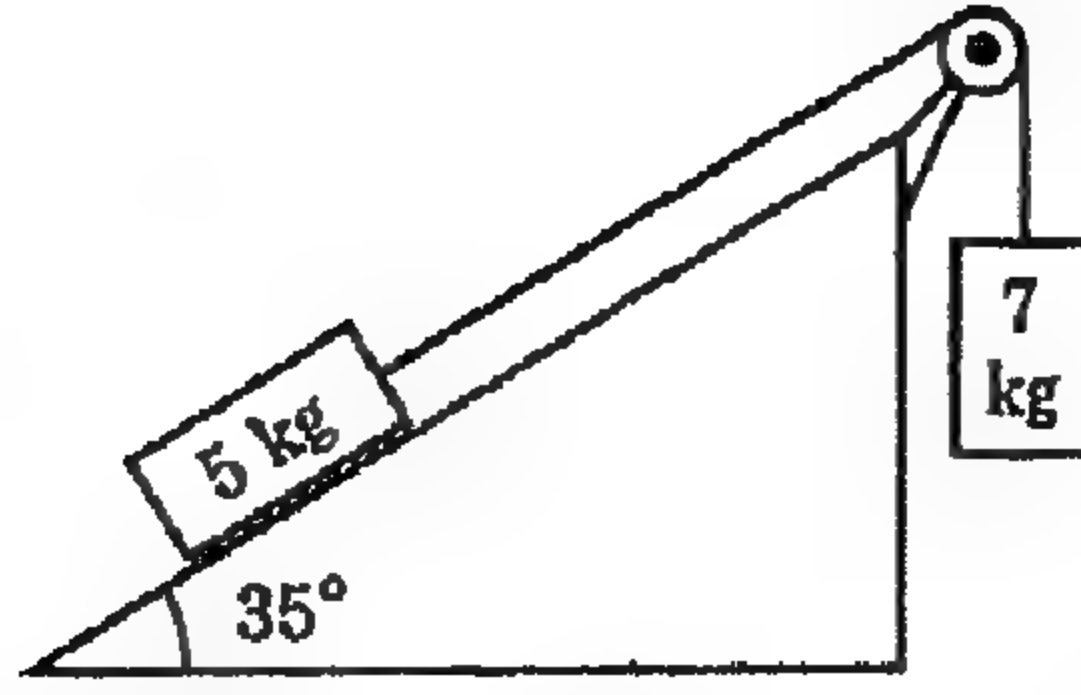
الشكل (م ٤ - ٢)

- ١٠ - بأي قوة يجب أن تدفع عجلات سيارة وزنها 3200 lb الطريق إلى الخلف إذا لزم أن تصعد هذه السيارة مسافة قدرها 200 ft على مستوى مائل زاوية ميله 11.5° في زمن قدره 40 s ؟ افترض أن السيارة تبدأ من السكون وأن متوسط قوة الاحتكاك هو 140 lb .
- ١١ - ما هي القوة التي تستطيع بها سيارة جر مغطورة كتلتها 2000 kg بواسطة وصلة جر الى أعلى على مستوى مائل زاوية ميله 11.5° عندما تنقصر السيارة بمعدل 0.5 m/s^2 ؟ اهل تأثيرات الاحتكاك .
- ١٢ - تدرجت بلية على منصدة افقية ارتفاعها 1.2 m ثم وقعت عند حافتها كما هو مبين في شكل م ٤ - ٢ . أوجد المسافة المرموز لها بالرمز x اذا كانت البلية تتدحرج بمعدل 2 m/s ما هما المركبتان الرأسية والأفقية لسرعة البلية قبل اصطدامها بالأرض مباشرة ؟
- ١٣ - يقذف خرطوم حريق الماء أفقيا من قمة مبنى عال تجاه حائط مبنى يقع على بعد 20 m . على أي بعد أسفل خرطوم الحريق يصطدم الماء بالحائط اذا كانت سرعة الماء عند خروجه من الخرطوم هو 5.0 m/s ؟ تلمييح : اعتبر الماء مكونا من سلسلة من الجسيمات المنطلقة في اتجاه التيار .



الشكل (م ٤ - ٣)

الشكل (م ٤ - ٤)



١٤ - انطلق الكترون ($m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$) افقيا من مدفعة الالكترونات الموجودة في طرف أنبوبة التليفزيون بسرعة قدرها 10^8 cm/s على أى بعد أسفل المستوى الأصلي يصطدم الالكترون بالستار الفلورى المستخدم للمشاهدة اذا كان هذا الستار يقع على بعد 40 cm في الطرف الآخر للأنبوبة ؟

١٥ - في احدى العاب السيرك انطلقت « القنبلة الأدمية » من المدفع بسرعة قدرها 18 m/s وكانت ماسورة المدفع موجهة بزاوية قدرها 40° فوق الأفقى . على أى بعد من فوهة المدفع يجب أن توضع الشبكة (المستخدمة لالتفاف الشخص) ؟
افترض أنها على نفس مستوى فوهة المدفع . واذا كان الشخص يتسارع بانتظام من السكون الى 18 m/s في مسافة قدرها 3 m داخل ماسورة المدفع ، فما هى القوة التى يجب ان تدفع هذا الشخص ؟ اعط اجابتك بدلالة وزن الشخص W .

١٦ - قذفت كرة من كوبرى ارتفاعه 30 m عن سطح الماء بسرعة قدرها 20 m/s بزاوية قدرها 30° تحت الأفقى . (أ) على أى بعد تصطدم الكرة بالماء بالنسبة لنقطة على سطح الماء تقع تحت نقطة القذف مباشرة ؟ (ب) ماهو الزمن الذى تقضيه الكرة في الهواء ؟
١٧ - كرر المسألة ١٦ بالنسبة لكرة تقذف بزاوية قدرها 30° فوق الأفقى .

*١٨ - كما هو موضح في شكل م ٤ - ٣ ، يريد أحد سائقى الدراجات البخارية البارعين أن ينطلق من المستوى المائل ويهبط على الرصيف . بأى سرعة يجب أن تتحرك الدراجة البخارية لكي ينجح السائق في ذلك ؟

*١٩ - قذف مقذوف من الأرض بسرعة قدرها v وبزاوية قدرها θ فوق الأرض الأفقية المستوية ثم عاد الى الأرض على مسافة R من نقطة القذف . اثبت أن مدى المقذوف يعطى بالعلاقة :

$$R = \frac{2v_0^2 \sin \theta \cos \theta}{g}$$

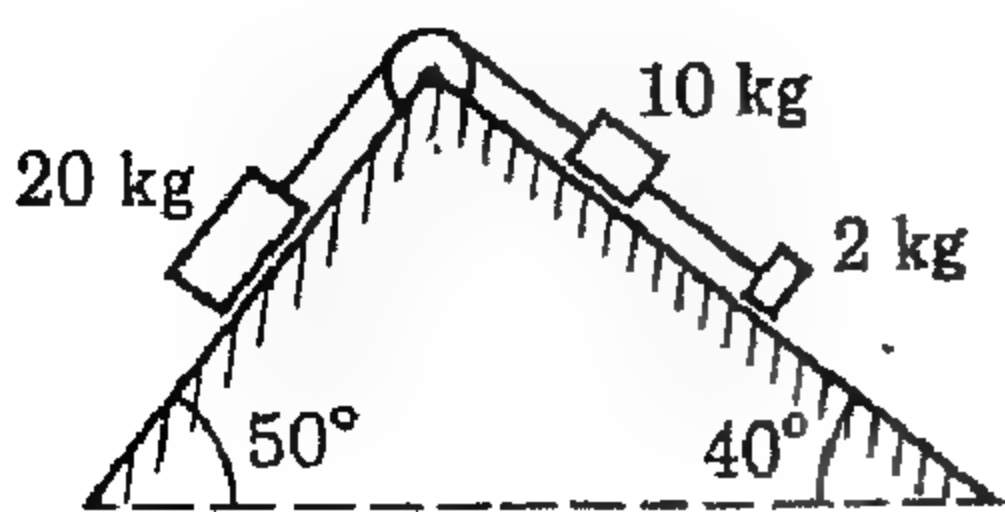
بفرض أن قوى الاحتكاك مهملة . باستخدام الصيغة المثلثية $2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$ اثبت أن المدى يصل الى النهاية العظمى اذا كانت $\theta = 45^\circ$

٢٠ - تأمل القالبين الموضحين في شكل م ٤ - ٤ . أوجد تسارع القالبين والشد في الحبل اذا كان الاحتكاك مهملا .

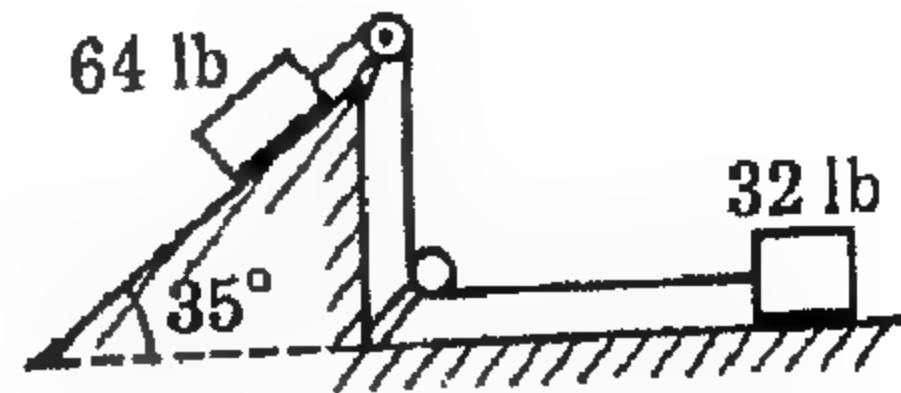
*٢١ - كرر المسألة ٢٠ بفرض أن $\mu = 0.20$.

*٢٢ - يعانى كل من القالبين الموضحين في شكل م ٤ - ٥ قوة احتكاك قدرها 5 lb . ماهو الزمن اللازم لكي يقطع القالب الذى كتله 32 lb مسافة قدرها 19 ft اذا بدأ من السكون .

*٢٣ - اوجد الشد في الحبال المختلفة الموضحة في شكل م ٤ - ٦ وتسارع القوالب اذا كان μ لكل منها يساوى 0.20 .



الشكل (م ٤ - ٦)



الشكل (م ٤ - ٥)

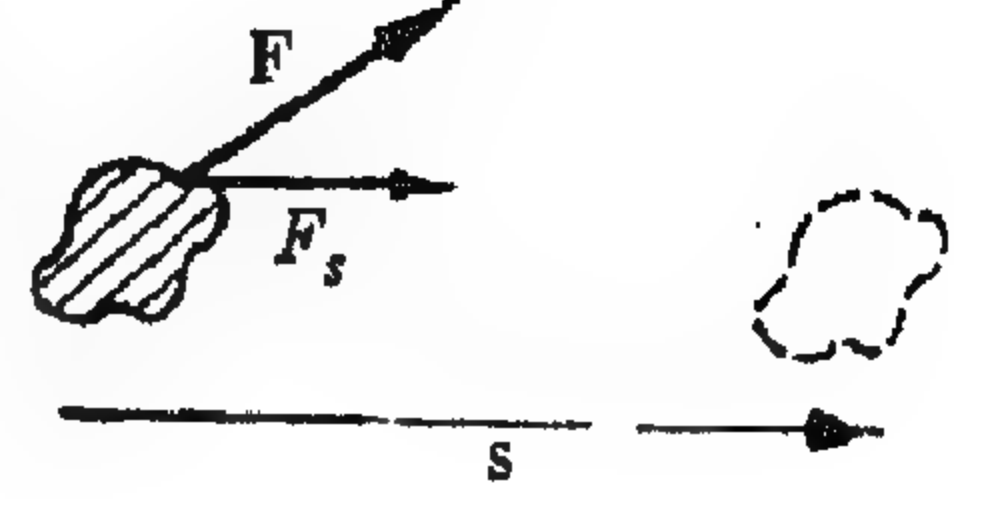
الفصل الخامس

الشغل والطاقة

إن أحد أهداف العلماء هو اكتشاف طرق توحيد وتبسيط مختلف الحقائق والمفاهيم في مجال تخصصهم . وقد ناقشنا في الفصول السابقة القوى وأثرها في إنتاج الحركة ، ويمكننا من ناحية المبدأ أن نصف جميع الحركات بدلالة القوى التي تسببها . ومع ذلك فإن المفهوم الذي سنقدمه في هذا الفصل وهو بقاء الطاقة يوحد ويبسط كثيرا وصف الحركة في كثير من الحالات . وسنجد أن مبدأ بقاء الطاقة هو مفهوم موحد هام ليس فقط في علم الميكانيكا ، ولكن أيضا في فروع أخرى من علم الفيزياء . ولكي نفهم هذا المبدأ سنناقش أولا مفهوم الشغل وكيف يؤدي الى مفهوم الطاقة .

٥ - ١ تعريف الشغل

عندما تجلس الى مكتبك لدراسة هذا الكتاب فانك لاتعمل شغلا . ولكن هذه العبارة لاتعنى أنك كسولا أو أن دراسة الفيزياء عملية لاتحتاج الى مجهود ، فهي تقرر فقط حقيقة تنشأ من تعريف الشغل كما يستخدمه العلماء . ونظرا لأن هناك طرقا كثيرة جدا لاستخدام كلمة الشغل في الحياة اليومية فان الاتفاق على معنى دقيق التحديد لهذه الكلمة يكتسب أهمية خاصة .



هل يعمل لاعب البيسبول شغلا عندما يلعب البيسبول ؟ قد يقول كثير من الناس أنه لايعمل لأنه يلعب لعبة مسلية . وماذا لو كان اللاعب يتقاضى أجرا ليلعب البيسبول ؟ هل تعمل الأرض المبنى عليها المنزل شغلا ؟ هي تحمل المنزل . وهل تختلف هذه الأرض في وظيفتها اذن اختلافا جوهريا عن العمود الذي يحمل سقف المدخل الخارجى للمنزل ؟ ومع ذلك فان البعض قد يصرون على أن العمود يعمل شغلا . من الواضح اذن أنه اذا أردنا استخدام كلمة الشغل كمصطلح علمي في الفيزياء فلا بد من تعريفه بطريقة دقيقة .

يعرف علماء الفيزياء وغيرهم من العلماء الشغل الذى تبذله قوة ما بالطريقة الآتية لنفرض أن القوة F تؤثر على جسم ما وأن هذا الجسم قد اكتسب ازاحة قدرها S . لنفرض زيادة على ذلك أن F_s هي مركبة F في اتجاه S كما هو مبين في شكل ٥ -

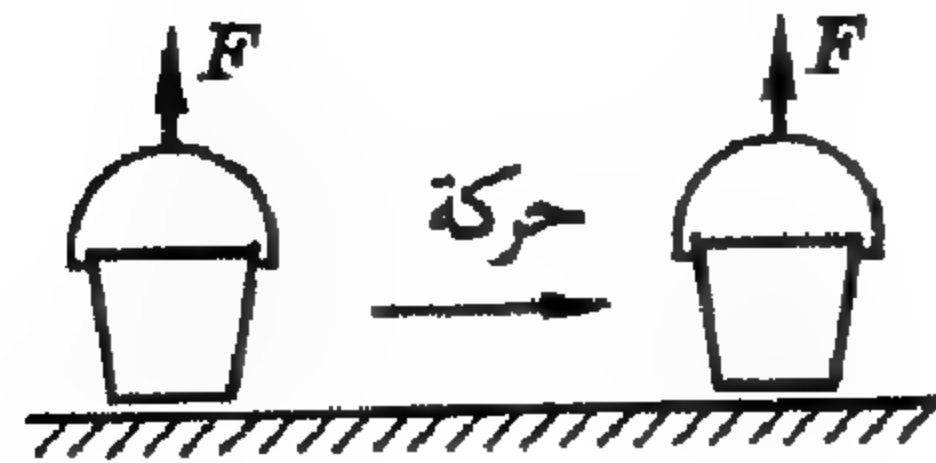
تعريف يعرف اذن الشغل المبذول بواسطة القوة F خلال الازاحة S بأنه :

الشغل

$$\text{Work done by } F = F_s s \quad (٥ - ١)$$

الشغل

وعند قبول هذا التعريف ينتج أن القوة الحاملة التى يؤثر بها عمود يحمل ثقلا لاتبذل شغلا ، فان هذا الثقل لايتحرك تحت تأثير القوة وعليه فان S تساوى صفرا . بالمثل ، عندما تحمل سطلا من الماء وتظل ساكنا في مكانك لمدة ساعة فان القوة الحاملة ليذك لاتبذل أى شغل على السطل لأن السطل لم يتحرك . وعليه فإن S تساوى صفرا وكذلك الشغل المبذول بواسطة القوة .



لنفرض أنك تحمل السطل على أرض مستوية وتعتبر به نقطتين المسافة بينهما $\frac{1}{2} \text{ mi}$. عندئذ يكون الشغل المبذول بواسطة القوة F على السطل صفرا حسب التعريف . وكما نرى من شكل ٥ - ٢ فإن يدك تجذب السطل الى أعلى بالقوة الحاملة F ، وعليه فإن F_s تساوى صفرا وكذلك فإن الشغل المبذول بواسطة القوة الحاملة أثناء هذه الازاحة يساوى صفرا* .

مثال توضيحي ٥ - ١ . كمثال توضيحي آخر لنفرض أنك كنت تجذب مزججة (زحافة) على جليد مستو كما هو موضح في شكل ٥ - ٣ أ . عندئذ ستبذل قوة قدرها F على المزججة بواسطة الحبل الذي تجذبه . ماهو الشغل الذي تبذله عندما تجذب المزججة مسافة قدرها s ؟

طريقة الحل . لاجابة هذا السؤال لاحظ أن القوة F يمكن اعتبارها مكونة من قوتين وهما مركبتها كما هو مبين في شكل ٥ - ٣ ب . وحيث أن المركبة الرأسية ، $F \sin \theta$ عمودية على اتجاه الحركة ، فانها لا تبذل شغلا على المزججة . أما المركبة الأفقية ، $F \cos \theta$ ، فانها موازية لاتجاه الحركة ، لذلك فانها تبذل شغلا على المزججة . الشغل المبذول هو :

$$\text{معادلة الشغل} \quad \text{Work} = (F \cos \theta)s = Fs \cos \theta \quad (٥ - ٢)$$

يمكن استخدام المعادلة (٥ - ٢) كمعادلة تعريف للشغل المبذول لأنها في الواقع المعادلة (٥ - ١) مكتوبة بطريقة مختلفة** . تقول هذه المعادلة ببساطة أن الشغل المبذول يساوى حاصل الضرب التالى : (القوة المؤثرة) (الازاحة) ، يجب - م ، زاوية المحصورة بين القوة والازاحة) . وفي بعض الأحيان ستستخدم المعادلة (٥ - ٢) بدلا من المعادلة المكافئة لها وهي المعادلة (٥ - ١) .

* إذا كان السطل متحركا بسرعة ثابتة بين النقطتين فمن السهل اثبات أن الشغل المبذول بواسطة القوى الأفقية على السطل يساوى صفرا . تذكر أنه في الحركة بسرعة ثابتة تكون القوة المحصلة المؤثرة على السطل مساوية للصفر . بناء على ذلك فإن صالى القوة الأفقية المؤثرة على السطل تساوى صفرا ، وعليه فإن القوى الأفقية لا تبذل أى شغل . أما إذا بدأ السطل حركته من السكون ثم توقف عن الحركة في الطريق فإن شغلا معيناً لابد أن يكون قد بذل في بداية الحركة ، ولكن هذا الشغل يسترد ثانية عند توقف الحركة كما سنرى في الأجزاء التالية . وهكذا فإن صالى الشغل المبذول بواسطة القوى الأفقية المؤثرة على السطل يساوى أيضا صفرا .

** في علم الفيزياء يكتب حاصل الضرب $Fs \cos \theta$ عادة على الصورة $F \cdot s$ وهذه المجموعة من الرموز تعنى بالكلمات مايلي : « نخذ حاصل ضرب مقدار القوة الموجهة في مقدار الازاحة الموجهة واضرب هذا الحاصل في جيب تمام الزاوية المحصورة بين المتجهين » . وباستخدام هذه المجموعة من الرموز تتحول معادلة تعريف الشغل الى الصورة التالية :

$$\text{Work} = F \cdot s$$

لاحظ أن $F \cdot s = F(s \cos \theta) = (F \cos \theta)s = Fs \cos \theta$. ويسمى حاصل ضرب المتجهين بهذه الطريقة بحاصل الضرب العدى .

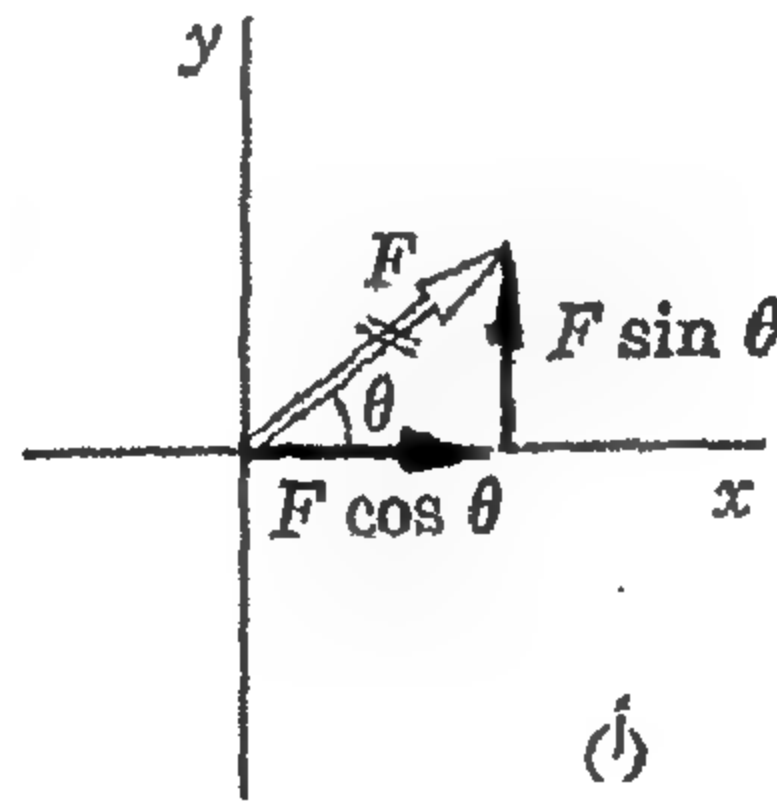
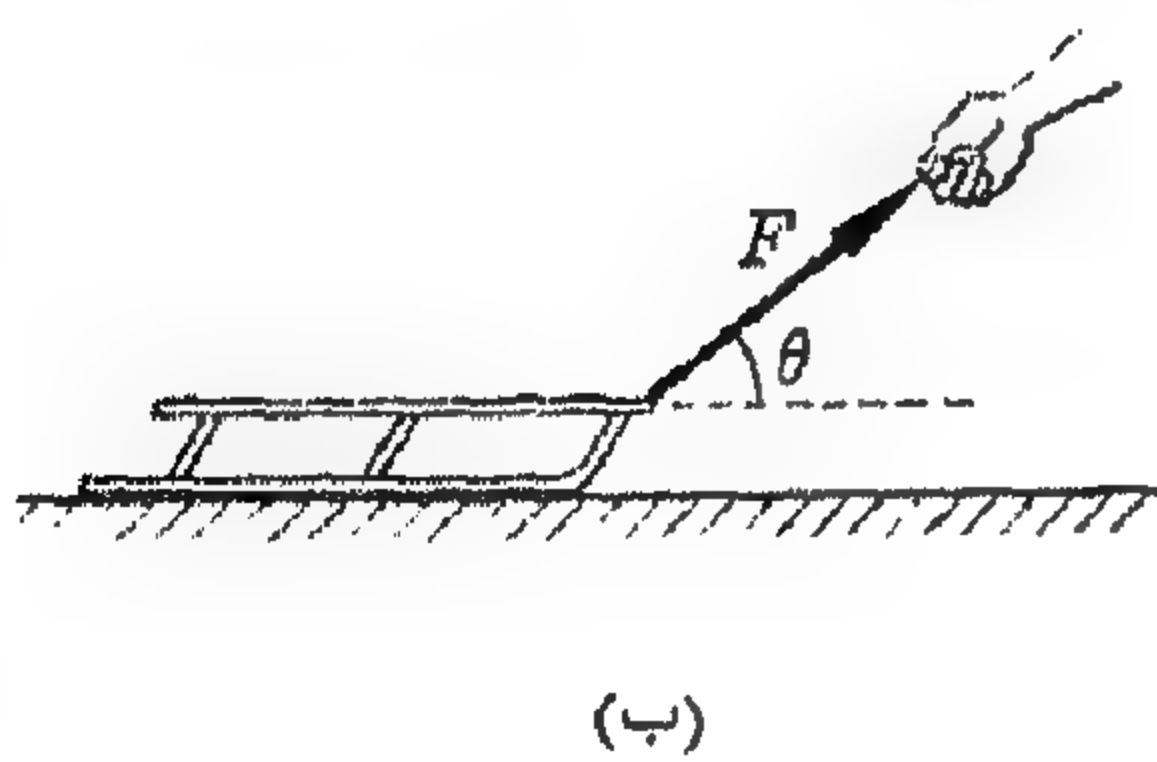
يمكننا استنتاج الوحدات المستخدمة لقياس الشغل من معادلة تعريف الشغل (٥ - ٥) -
(١) أو (٥ - ٢) . هناك ثلاث وحدات مختلفة للشغل ، واحدة لكل من النظام
البريطاني والنظام SI والنظام cgs للوحدات . تعرف هذه الوحدات الثلاث كمايلي .

الشغل	=	$F_s \times s$
قدم . باوند		باوند
النظام البريطاني		
النظام SI		نيوتن
الرجل		داين
النظام cgs		

لايجب أبدا خلط الوحدات في هذه المعادلة ، ويجب أن تكون
الكميات مقاسة في نظام وحدات واحد .

وححدات الشغل
وقياسا على الطريقة التي تسمى بها الوحدة البريطانية للشغل، يسمى الجول (J) من
الشغل أحيانا بالنيوتن - متر من الشغل . وبالمثل ، فان الإرج من الشغل يسمى
أحيانا بالداين . سنتيمتر من الشغل . ومع ذلك فان الجول والإرج هما الصورتان
المفضلتان . لاحظ أن الإرج من الشغل صغير جدا لأن كمي من الداين والسنتيمتر
وحدات صغيرة جدا للقوة والمسافة . وحيث أن النيوتن اكبر من الداين 10^5 مرة والمتر
اكبر من السنتيمتر 10^2 مرة فان الجول اكبر من الارج 10^7 مرة . كذلك يمكننا أن
نثبت أن الجول من الشغل اصغر قليلا من القدم - باوند من الشغل ، والعلاقة
التقريبية بينهما كالتالي :

$$1 \text{ J} = 0.738 \text{ ft} \cdot \text{lb}$$



شكل (٥ - ٣)
لاتبدل المركبة الرأسية للقوة F
أى شغل لأن المزلة لا تتحرك
الى أعلى أو الى أسفل . يبذل
الشغل جميعه بواسطة القوة
 $F \cos \theta$ وهى المركبة الموازية
لاتجاه الحركة .

لنلخص الآن ماتعلمناه عن الشغل .

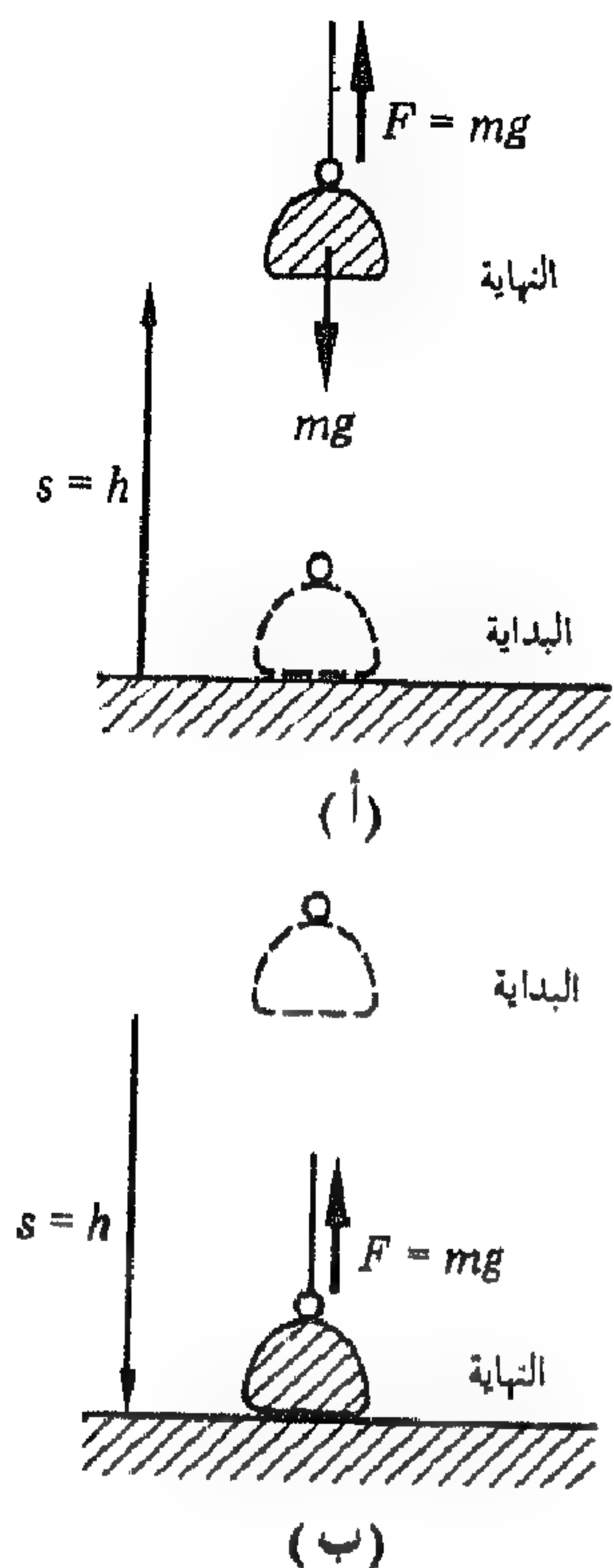
الشغل المبذول بواسطة القوة F المؤثرة أثناء الازاحة S هو :

$$F_s s \quad \text{أو} \quad F s \cos \theta$$

في هذين التعبيرين المتكافئين F هى مركبة F فى اتجاه الازاحة S والزاوية
 θ هى الزاوية المحصورة بين F و S .

وحدات الشغل هي الجول أو الإرج أو القدم - باوند كما هو مبين في الجدول المعطى في الصفحة السابقة .

مثال توضيحي ٥ - ٢ . ماهو الشغل الذى تبذله على جسم وزنه mg عندما ترفعه ببطء مسافة قدرها h رأسيا الى أعلى ؟ كرر المسألة في حالة خفض الجسم ببطء نفس المسافة .



طريقة الحل . هذان الوضعان ممثلان في شكل ٥ - ٤ . لكى يرفع الجسم لابد من جذبه الى أعلى بقوة تساوى وزنه mg لتحقيق ذلك نحتاج الى قوة اكبر قليلا من وزنه لكى يكتسب الجسم تسارعا ابتدائيا الى أعلى . ولكن بمجرد أن يتحرك الجسم لن نحتاج الى أية قوة محصلة لكى تستمر الحركة . ونتيجة لذلك فان قوة جاذبة الى أعلى تساوى وزن الجسم هي التى تلزم لحركة الجسم بسرعة ثابتة الا في اللحظة الأولى فقط . وكما نرى من شكل ٥ - ٤ أ فإن القوة الرافعة هي mg وتساوى وزن الجسم . ولكن الازاحة h رأسية الى أعلى والقوة الرافعة في نفس الاتجاه . اذن يمكننا استخدام أى من المعادلتين (٥ - ١) أو (٥ - ٢) لنحصل على :

$$\text{Work} = F_s s = F s \cos 0^\circ = (mg)h$$

وهذا هو الشغل الذى يجب أن تبذله لرفع الكتلة مسافة h .

من ناحية أخرى يوضح الشكل ٥ - ٤ ب ما يحدث عندما تخفض الكتلة . في هذه الحالة يكون كل من القوة F والازاحة S في اتجاهين متعاكسين .

اذن $F = mg$ و $\theta = 180^\circ$. وباستخدام المعادلة (٥ - ٢) نجد ان :

$$\text{Work} = F s \cos \theta = (mg)(h) \cos 180^\circ = -mgh$$

الشغل السالب

لاحظ أن الشغل المبذول بواسطة القوة يكون سالبا اذا كانت الازاحة في عكس اتجاه القوة .

مثال توضيحي ٥ - ٣ : يمثل شكل ٥ - ٥ صندوقا يجذب على الأرضية بسرعة ثابتة بقوة قدرها F . ولنفرض أن قوة الاحتكاك المعاكسة للحركة هي 20 N وأن كتلة الصندوق هي 30 kg . اوجد الشغل المبذول بواسطة القوة الجاذبة عندما يتحرك الجسم مسافة قدرها 5.0 m .

طريقة الحل . حيث أن الجسم يتحرك بسرعة ثابتة فإن القوة غير المترنة المؤثرة عليه لابد أن تساوى صفرا ، أى أن $\Sigma F_x = 0$. يمثل الشكل ٥ - ٥ ب رسم بيان الجسم الحر في هذه الحالة . وبناء على ذلك نجد أن العلاقة $\Sigma F_x = 0$ تتحول الى الصورة :

شكل (٥ - ٤)
الشغل المبذول بواسطة القوة
الرافعة يساوى mgh في الحالة
(أ) ويساوى $-mgh$ في الحالة
(ب) .

$$0.8F - 20 \text{ N} = 0$$

ومن هذه المعادلة نجد أن :
 $F = 25 \text{ N}$

لايجاز الشغل المبذول بواسطة هذه القوة يمكننا استخدام العلاقة التالية :

$$\text{Work} = F_s s \quad \text{لنحصل على :}$$

$$\text{Work} = (0.80F)(5.0 \text{ m}) = 100 \text{ N} \cdot \text{m} = 100 \text{ J}$$

كذلك يمكننا استخدام العلاقة :

$$\text{Work} = Fs \cos \theta \quad \text{لنحصل على :}$$

$$\text{Work} = (25 \text{ N})(5 \text{ m})(0.80) = 100 \text{ J}$$

لاحظ أن المركبة r للقوة F لاتبذل أى شغل ، وذلك لأن الازاحة لاتحدث فى هذا الاتجاه .

٥ - ٢ القدرة

يسمى معدل بذل الشغل بالقدرة ، وهى تعرف بأنها الشغل المبذول وحدة الزمن . ويمكننا كتابة هذا التعريف على صورة الصيغة الرياضية الآتية :

$$\text{القدرة} = \frac{\text{الشغل المبذول}}{\text{الزمن اللازم لبذل الشغل}} \quad (٥ - ٣)$$

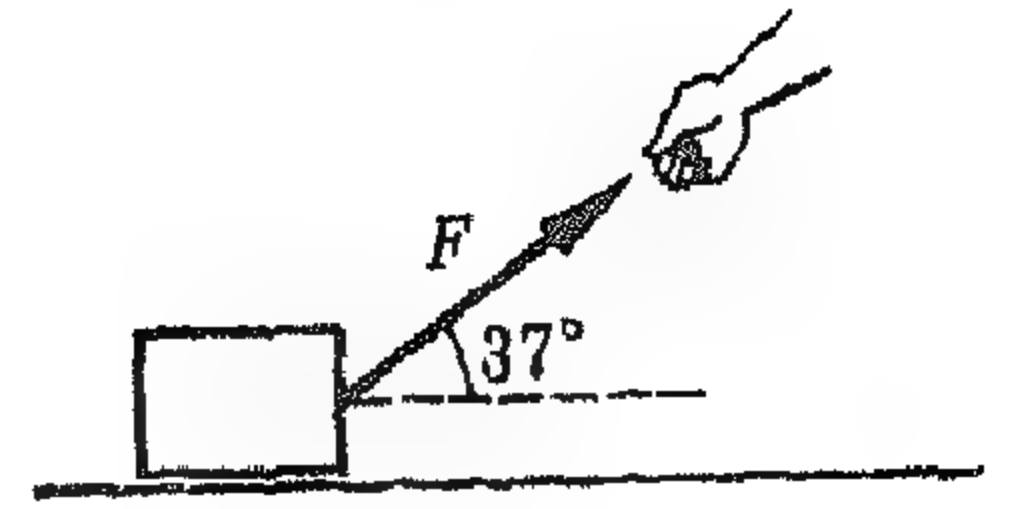
$$P = \frac{\text{شغل}}{\text{الزمن}}$$

وحدات القدرة عبارة عن أى وحدة للشغل مقسومة على أى وحدة للزمن . ولكن الوحدات الاكثر شيوعا هى :

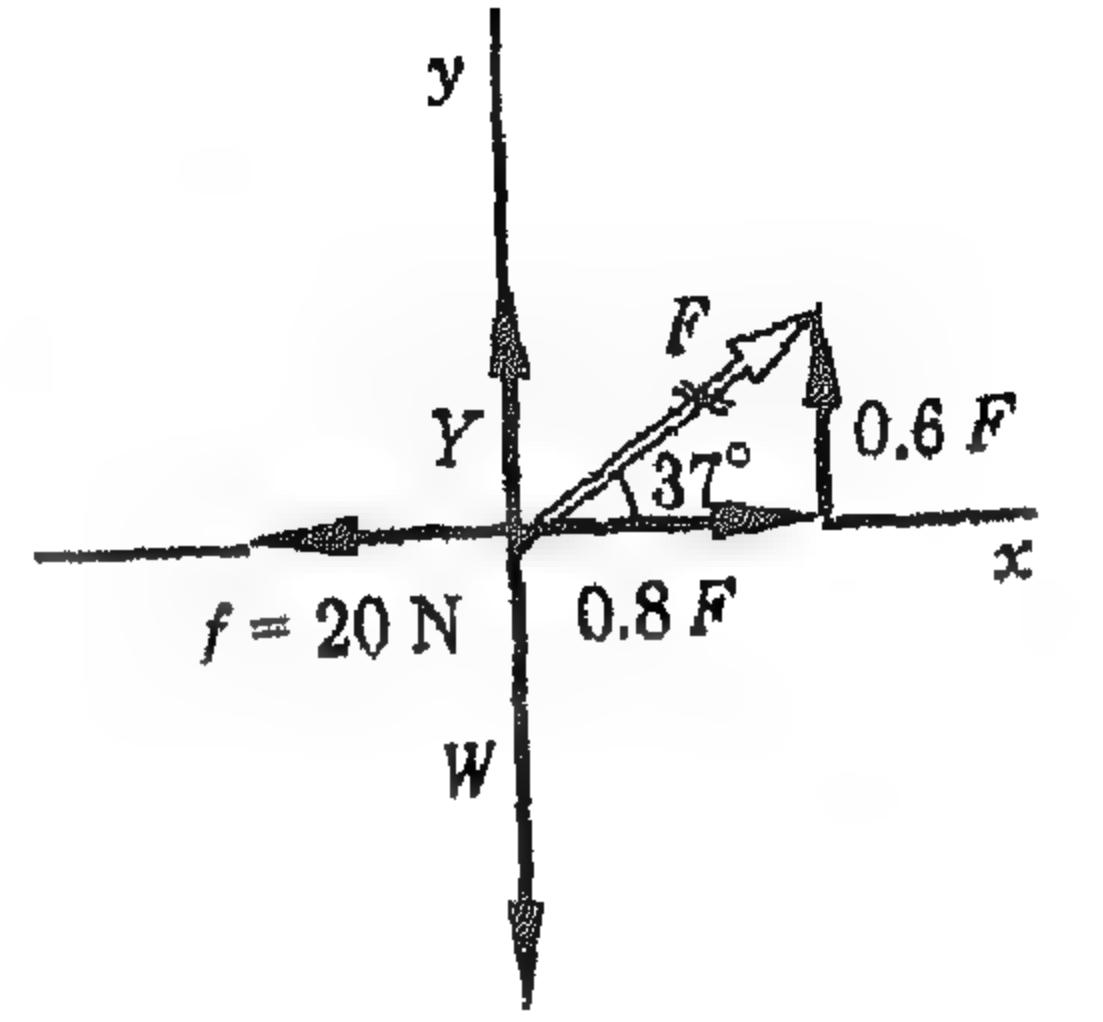
$$P \rightarrow \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{watts (W)}$$

$$P \rightarrow \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{s}}$$

فى بعض الأحيان تستخدم وحدات اخرى للقدرة . فمثلا ، الكيلو واط وهى وحدة اكبر بمقدار 1000 مرة من الواط . وتستخدم وحدة قدرة الحصان (hp) كثيرا فى النظام البريطانى ، وتعرف هذه الكمية بأنها $550 \text{ ft} \cdot \text{lb/s}$



(أ)



(ب)

تعريف

شكل (٥ - ٥)

المركبة الافقية للقوة F تبذل شغلا على الجسم ولكن الشغل المبذول بواسطة المركبة الرأسية يساوى صفرا .

وحيث أن $1 \text{ ft} \cdot \text{lb/s}$ تكافئ 1.36 W فإن 1 hp تساوي 746 W من القدرة .
وحيث أن تعريف القدرة هو :

$$\frac{\text{الشغل}}{\text{الزمن}} = \text{القدرة}$$

$$P = \frac{\text{work}}{\text{time}}$$

فإن :

$$\text{الشغل} = (\text{الزمن}) (\text{القدرة})$$

$$\text{Work} = (\text{power})(\text{time})$$

وتعتبر هذه المعادلة للشغل اساس وحدة الشغل أو الطاقة التي سنقابلها في علم الكهرباء وهي الكيلو واط ساعة (KWh). وهذا يعنى أنه إذا كان خرج القدرة لمكنة (آلة) مقاسا بالكيلو واط وكان زمن التشغيل مقاسا بالساعة فإن حاصل ضرب القدرة في الزمن يعطى الشغل بالكيلو واط ساعة .

مثال توضيحي ٥ - ٤ . لنفرض أن الموتور الموضح في شكل ٥ - ٦ يرفع جسما وزنه 480 lb بسرعة ثابتة قدرها 2 in/s . ماهى القدرة بالحصان التي ينتجها الموتور ؟ وماهى القدرة بالواط ؟

طريقة الحل : يبذل الموتور الكمية التالية من الشغل في زمن قدره 1 s :

الشغل المبذول في زمن قدره $1 \text{ s} = (\text{المسافة المرفوعة في } 1 \text{ s}) (\text{القوة})$.

$$\begin{aligned} \text{Work in } 1 \text{ s} &= (\text{force})(\text{distance lifted in } 1 \text{ s}) \\ &= (480 \text{ lb})(\frac{2}{12} \text{ ft}) = 80 \text{ ft} \cdot \text{lb} \end{aligned}$$

ولكن من تعريف القدرة :

$$\text{Power} = \frac{\text{work}}{t} = \frac{80 \text{ ft} \cdot \text{lb}}{1 \text{ s}} = 80 \text{ ft} \cdot \text{lb/s}$$

$$= (80 \text{ ft} \cdot \text{lb/s}) \left(\frac{1 \text{ hp}}{550 \text{ ft} \cdot \text{lb/s}} \right) = 0.145 \text{ hp}$$

وحيث أن $1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$ ، فإن :

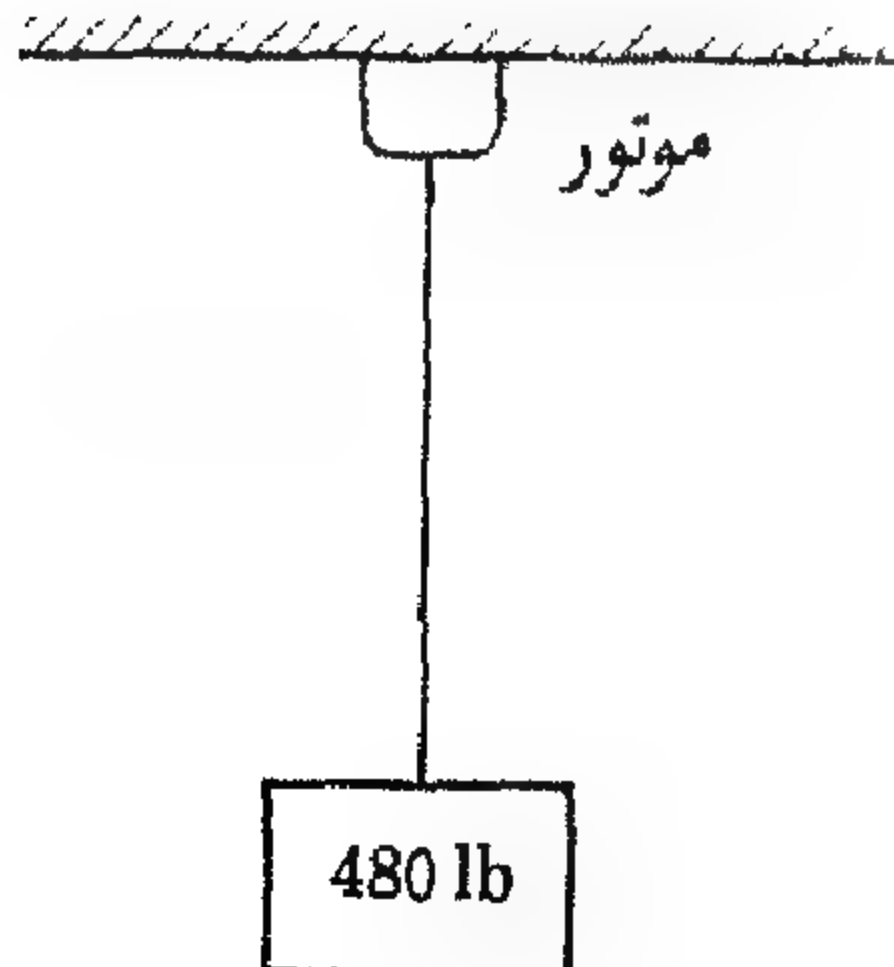
$$\text{Power} = (0.145 \text{ hp}) \left(\frac{746 \text{ W}}{1 \text{ hp}} \right) = 108 \text{ W}$$

شكل (٥ - ٦)

يراد إيجاد خرج القدرة لموتور

يرفع الجسم بسرعة قدرها

2.0 in/s



٥ - ٣ طاقة الحركة

يستطيع الجسم المتحرك أن يبذل شغلا ، فمثلا تبذل المطرقة شغلا على المسامير عند طرده لادخاله في قطعة الخشب . كذلك فإن كرة البيسبول يمكن أن تكسر النافذة عندما تصطدم بها . هناك أيضا أمثلة أخرى يمكن أن نسوقها لتوضيح أن الجسم المتحرك عندما يبطل حركته فإنه يبذل شغلا . وكما سنرى فيما بعد فإن

هذه حقيقة هامة جدا وسوف نستخدمها كثيرا . لتبين الآن كيف يرتبط الشغل بالحركة .

لكي نبدأ مناقشتنا لتبين الآن كيف تعتمد حركة الجسم على القوة غير المتزنة المؤثرة عليه . لنفرض أن جسما كتلته m يقع تحت تأثير قوة محصلة ثابتة F في اتجاه الازاحة s . الشغل المبذول بواسطة هذه القوة أثناء هذه الازاحة يعطى بالعلاقة :

$$\text{Work} = Fs$$

يراد الآن ايجاد العلاقة بين الشغل والتغير في حركة الجسم الناتجة من هذه القوة غير المتزنة .

من المعروف أن القوة غير المتزنة F ترتبط بتسارع الجسم حسب العلاقة $F = ma$ ، وعليه فان المعادلة السابقة للشغل ستأخذ الصورة :

$$\text{Work} = mas$$

لنفرض أن v_0 هي السرعة الابتدائية للجسم و v_f هي سرعته النهائية بعد بذل الشغل . وحيث أن :

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

يمكننا بالتعويض أن نحصل على العلاقة :

$$\text{Work} = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

وهذه علاقة هامة جدا ، وهي تبين أن :

الشغل المبذول بواسطة القوة المحصلة على الجسم يؤدي إلى تغير في حركة الجسم . لدينا إذن العلاقة :

$$\text{الشغل المبذول بواسطة القوة المحصلة} = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (٥ - ٤)$$

وبالرغم من أن هذه العلاقة قد استنتجت في حالة ثبوت القوة المحصلة فإنها صحيحة في جميع الحالات . فاذا وقع الجسم تحت تأثير قوة محصلة ما فإن الشغل المبذول بواسطة القوة يرتبط بالتغير في سرعة الجسم حسب المعادلة (٥ - ٤) .

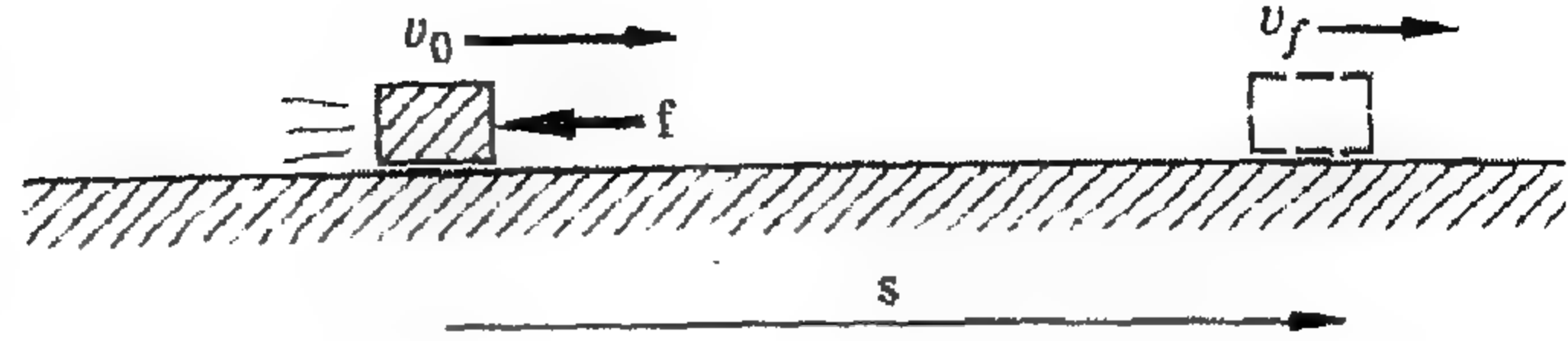
عند اشتقاق هذه المعادلة فرضنا ضمنا أن القوة تسبب زيادة سرعة الجسم . ومع ذلك فليس هناك ما يحتم ذلك في اشتقاق هذه المعادلة ، إذ أن المعادلة (٥ - ٤) تظل صحيحة أيضا إذا كان الجسم يبطىء حركته . ويمكن اثبات ذلك بالرجوع الى شكل ٥ - ٧ . يمثل هذا الشكل جسما يبطىء من حركته عند الانزلاق على منضدة . لاحظ أن قوة الايقاف وهي قوة الاحتكاك f في عكس اتجاه الازاحة .

ونتيجة لذلك فإن $Fs \cos \theta$ تصبح سالبة في هذه الحالة $\cos \theta = -1$. وإذا نظرنا الآن الى المعادلة (٥ - ٤) فاننا سنجد أن v_f لابد أن تكون اصغر من v_0 لأن الشغل المبذول سالب في هذه الحالة . وتوضح لنا هذه المعادلة أن الجسم يتباطأ نتيجة لشغل الاحتكاك السالب المبذول عليه .

شكل (٥ - ٧)

تبذل قوة الاحتكاك شغلا سالباً على القالب . وعليه فإن القالب يتباطأ حسب العلاقة .

$$fs \cos \theta = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$



وكما نرى من هذه المناقشة ، يرتبط الشغل بالكمية $\frac{1}{2}mv^2$. وقد سميت هذه الكمية تعريف بطاقة الحركة (KE) . وقد اشتق هذا الاسم من الكلمات اليونانية *kinetikos* (وتعني «بعث الحركة») و *energeia* (وتعني «نشاط») .

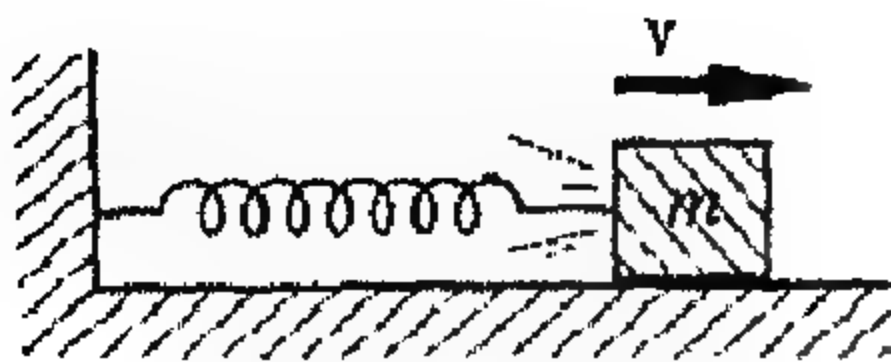
يمكننا أذن وضع التعريف التالي : طاقة الحركة (KE) هي $\frac{1}{2}mv^2$ ، وهي تمثل الحد الأقصى للشغل الذي يستطيع أن يبذله جسم كتلته m نتيجة لحركته بسرعة قدرها v .

لتوضيح ذلك تذكر أننا قد رأينا من الشكل ٥ - ٧ أن الجسم يفقد طاقة الحركة عندما يبذل شغلا ضد قوة الاحتكاك . وفي الحقيقة فإن طاقة الحركة المفقودة تساوى الشغل المبذول ضد قوة الاحتكاك . وليس من الضروري أن تكون قوة الايقاف هي قوة الاحتكاك بالذات ، فهي يمكن أن تكون مثلاً نتيجة لسلك زنبركى مثبت في الجسم كما هو مبين في شكل (٥ - ٨) حيث يسبب القالب المنزلق استطالة السلك الزنبركى عندما يتباطأ ويصل الى السكون . ويستغل الشغل المبذول ضد قوة الاحتكاك في هذه الحالة في استطالة السلك . هناك أمثلة كثيرة أخرى يمكن أن نذكرها لبيان ان الجسم المتحرك يبذل شغلا عندما يصل الى السكون أو يبطيء من حركته . وقد وجد أن العبارة التالية صحيحة في مثل هذه الحالات :

عندما يفقد الجسم طاقة الحركة فانه يبذل كمية من الشغل تساوى طاقة الحركة المفقودة .

شكل (٥ - ٨)

في خلال الزمن الذي تصل الكتلة خلاله الى السكون تكون قد بذلت شغلا قدره $\frac{1}{2}mv^2$ في اطالة السلك الزنبركى .



لنطبق الآن هذه النتيجة على بعض الأمثلة .

مثال توضيحي ٥ - ٥ : تتحرك سيارة كتلتها 2000 kg بسرعة قدرها 20 m/s وتبطيء من سرعتها لتصل الى السكون على أرض مستوية في مسافة قدرها 100 m . ماهو متوسط قوة الاحتكاك التي تسبب وقوف السيارة ؟

طريقة الحل . تفقد السيارة حركتها الابتدائية في بذل الشغل ضد متوسط قوة الاحتكاك \bar{f} اذن :

الشغل المبذول ضد قوة الاحتكاك = طاقة الحركة المفقودة

Loss in KE = work done against friction force

$$\frac{1}{2}mv^2 = \bar{f}s$$

$$\frac{1}{2}(2000 \text{ kg})(20 \text{ m/s})^2 = (\bar{f})(100 \text{ m})$$

$$\bar{f} = 4000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 4000 \text{ N}$$

تم الحصول على العلاقة المتبادلة للوحدات في هذه الخطوة الأخيرة بكتابة الوحدات في المعادلة $F = ma$.

مثال توضيحي ٥ - ٦ اذا كانت قوة الاحتكاك المؤثرة على السيارة في المثال التوضيحي ٥ - ٥ ثابتة وتساوى 4000 N ، فما سرعة حركة السيارة بعد أن تقطع مسافة 50 m ؟

طريقة الحل . طاقة حركة السيارة المفقودة خلال الزمن الذى تقطع فيه السيارة 50 m استهلكت في بذل الشغل ضد الاحتكاك . اذن :

شغل الاحتكاك المبذول = طاقة الحركة المفقودة

Loss in KE = friction work done

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_f^2 = \bar{f}s$$

$$\frac{1}{2}(2000 \text{ kg})(20 \text{ m/s})^2 - \frac{1}{2}(2000 \text{ kg})v^2 = (4000 \text{ N})(50 \text{ m})$$

أو ، بعد اعادة ترتيب الحدود :

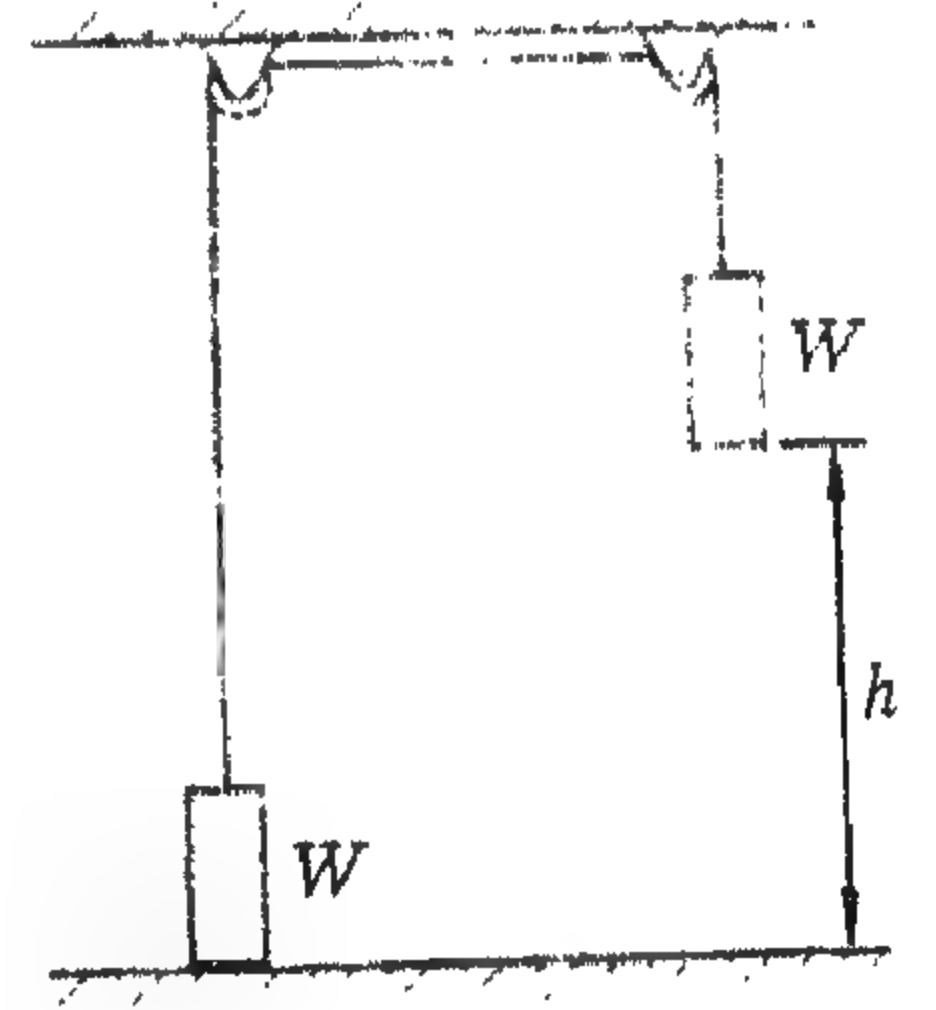
$$v^2 = 400 - 200 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$v = \sqrt{200} \text{ m/s} = 14.1 \text{ m/s}$$

حيث استخدمنا حقيقة أن 1 N يساوى $1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$.

٥ - ٤ طاقة الوضع

تأمل المجموعة الموضحة في شكل ٥ - ٩ واعتبر أن البكرتين لا احتكاكيتين . حيث أن الجسمين متماثلان تماما ووزن كل منهما $W = mg$ ، فإذا دفع الجسم العلوى دفعة صغيرة الى أسفل فان الجسم الايمن سوف يسقط الى الأرضية بسرعة ثابتة أما الجسم الايسر فانه سوف يرتفع الى ارتفاع قدره h فوق الأرضية . أى أن ارتفاعه سيزداد بمقدار h .



شكل (٥ - ٩)

عندما يسقط الجسم الايمن فانه يبذل شغلا في رفع الجسم الايسر . وفي هذه الحالة يتعادل فقد طاقة وضع الجسم الأيمن مع كسب طاقة وضع الجسم الآخر .

السؤال الآن هو : ماقيمة الشغل المبذول على الجسم الایسر بواسطة الجبل عندما يرتفع هذا الجسم فوق الأرضية ؟ من الواضح أن الشغل يساوى الشد في الجبل mg مضروباً في الارتفاع الذى يرتفعه الجسم .

$$\text{الشغل المبذول} = mgh$$

ماهو العامل الذى بذل هذا الشغل ؟ هذا بالطبع هو وزن الجسم الايمن الذى يجذب الجسم الآخر الى أعلى ، وبالتالي ، فانه يبذل الشغل . يجب أذن أن نستنتج أن الجسم الايمن كان قادراً على بذل الشغل عندما كان معلقاً في موضعه الأصلي فوق أرضية الغرفة . يقال عندئذ أن هذا الجسم كان يملك طاقة وضع (PE) ثقالية تعريف عندما كان في هذا الموضع ... وطاقة الوضع التى يملكها الجسم هي مقدار الشغل الذى يستطيع الجسم بذله بسبب موضعه . وتعطى طاقة حركة الجسم الموجود في مجال الجاذبية للأرض بالعلاقة .

$$\text{طاقة الوضع الثقالية} = mgh \quad (5 - 5) \quad \text{طاقة الوضع الثقالية}$$

حيث m كتلة الجسم ، g تسارع الجاذبية* . وحدات طاقة الوضع هي نفس وحدات الشغل ، أى جول أو ارج أو قدم - باوند كما يمكنك أن تتأكد من المعادلة (5 - 5) . لاحظ في المعادلة (5 - 5) أن h هو الفرق بين الارتفاعين ، وهو يمثل المسافة التى ارتفعها الجسم فوق مستوى مرجعى معين .

وفيما يتعلق بهذه الحقيقة، من الضروري أن نذكر حقيقة هامة أخرى عن طاقة الوضع ، ويمكن صياغتها بالطريقة التالية :

المستوى الصفرى لحساب طاقة الوضع اختياري .

فمثلاً يعتبر اختيار الوضع الذى يقاس ارتفاع الجسم بالنسبة اليه مسألة اختيار شخصي بحث . فقد يقول شخص ما أن الجسم يقع على ارتفاع قدره 50 cm من سطح المنضدة وبالتالي فان ارتفاعه هو 50 cm . وقد يقول شخص آخر انه حيث أن سطح المنضدة يقع على ارتفاع 90 cm من الأرضية فان ارتفاع الجسم هو 140 cm . وقد يقول شخص ثالث أن موضع الجسم يقع على بعد 60 cm تحت سقف الغرفة .

* g لانتسارى 9.8 m/s^2 في المواضع التى تقع على ارتفاع كبير من سطح الأرض . في هذه الحالة لا تكون طاقة الوضع مساوية للمقدار mgh .

بالنسبة لهذا الشخص يكون الارتفاع هو 60 cm — وجميع الاختيارات الأخرى ممكنة وصحيحة . كما سنرى فإن الحسابات تتعلق فقط بالتغيرات في طاقة وضع الأجسام . وتسمح لنا هذه الحقيقة بأن نأخذ المستوى الصفرى لطاقة الوضع في أى مكان مناسب .

٥ - ٥ قوة الجذب هي قوة احتفاظية

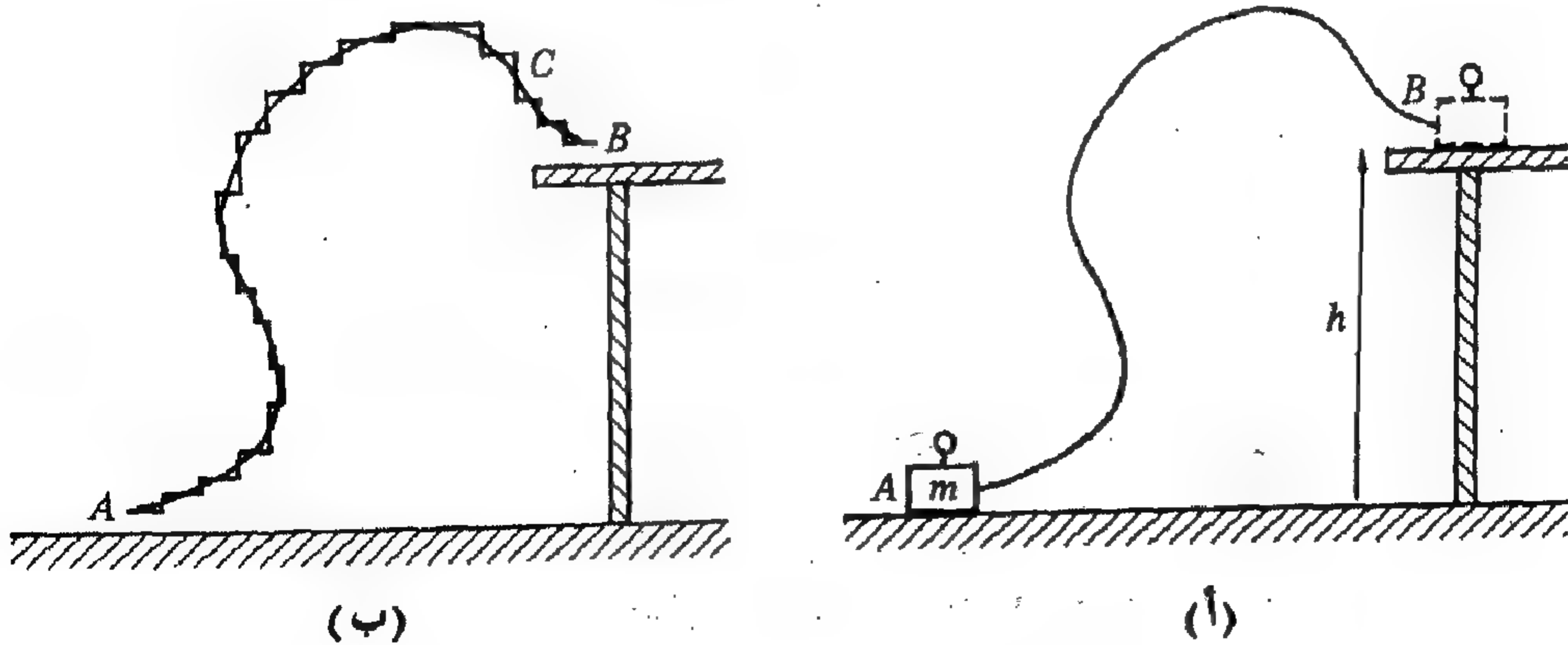
لقد رأينا فيما سبق مواقف عديدة يتبدل الشغل فيها لرفع الجسم . ولكى يرتفع الجسم رأسيا إلى أعلى بسرعة ثابتة نحتاج إلى قوة تساوى وزن الجسم mg ، ونتيجة لذلك فإن الشغل المبذول في رفع الجسم رأسيا إلى أعلى مسافة قدرها h هو (mgh) . وسنثبت الآن أنه حتى إذا لم يرفع الجسم رأسيا إلى أعلى فإن نفس النتيجة ستظل صحيحة .

لنفرض أننا نريد رفع الكتلة الموضحة في شكل ٥ - ١٠ أ من الأرضية إلى المنضدة . ماهو الشغل الذى يجب بذله لتحقيق ذلك ؟ لنرفع الجسم على طول المسار الموضح بالخط الاسود من A إلى B .

لحساب الشغل المبذول في رفع الكتلة من A إلى B يمكننا تقريب المسار الفعلى إلى المسار المستقيم الموضح في الجزء ب من الرسم . وبجعل اطوال الأسنان صغيرة جدا يمكن جعل المسارين متماثلين لجميع الأغراض العملية . لاحظ أن القوى الرافعة رأسية . وعليه فإنها لا تبذل أى شغل في الحركات الأفقية الصغيرة للمسار المستقيم* بينما يبذل الشغل بواسطة القوة الرافعة في الحركات الرأسية فقط . وعندما يرفع الجسم فإن الشغل المبذول يكون موجبا . ولكن عندما ينخفض (قرب النقطة C) فإن الشغل المبذول يكون سالبا . وتأثير ذلك هو أن الحركات الرأسية إلى أسفل تلاشى الشغل المبذول أثناء الحركات الرأسية المكافئة إلى أعلى .

شكل (٥ - ١٠)

يمكن تقريب المسار في (أ) بسلسلة من الخطوات الأفقية والرأسية كما هو موضح في (ب) .



*تذكر أن قوة صغيرة جدا يمكن إهمالها تلزم لحدوث الحركة الأفقية .

نستنتج من ذلك اذن أن الشغل يعتمد فقط على محصلة التأثير لجميع الحركات الرأسية . وعند رفع الجسم من A الى B فانه يكون قد ارتفع مسافة صافية قدرها h ونتيجة لذلك فان الشغل المبذول يكون mgh .

ولكن هذا الشغل هو نفس الشغل المبذول لرفع الجسم رأسيا من A مسافة قدرها h ثم تحريكه جانبيا الى النقطة B . وفي الحقيقة ، حيث أن المسار الموضح من A الى B اختياري تماما ، ويمكننا أن نستنتج مايلي :-

اذا كانت النقطة A تقع على مسافة قدرها h تحت النقطة B فإن الشغل المبذول ضد الجاذبية لرفع الكتلة m من A الى B هو mgh . وهذه النتيجة صحيحة بالنسبة لأي مسار يؤخذ بين A و B .

وبالطبع ، اذا خفض الجسم من النقطة B الى النقطة A فان الشغل المبذول ضد الجاذبية سيكون $-mgh$.

تعتبر قوة الجذب مثالا للقوة الاحتفاظية . ويقال ان القوة احتفاظية تعريف اذا كان الشغل المبذول في تحريك الجسم من النقطة A الى النقطة B ضد القوة لايعتمد على مسار الحركة . وسنرى فيما بعد أن القوى الاستاتيكية الكهربائية والنوية هي أيضا قوى احتفاظية . ومن ناحية اخرى فان قوى الاحتكاك ليست احتفاظية ويمكنك التحقق من ذلك بسهولة بأن تزلق كتابك من نقطة الى اخرى على المنضدة . ومن الواضح أنك ستضطر الى بذل شغل اكبر عندما تزلقه في مسار معقد طويل عنه في حالة ما اذا اتبعت مسارا مستقيما قصيرا . وهذا لايمكن ان يحدث اذا كانت قوة الاحتكاك احتفاظية .

٥ - ٦ التحول المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الوضع

في كل مرة تقذف فيها جسما في الهواء أو تسقطه فانك ترى مثالا للتحول المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الوضع . فمثلا ، عندما تقذف قطعة عملة معدنية الى أعلى كما هو مبين في شكل ٥ - ١١ فان طاقة حركتها الابتدائية تتحول الى طاقة وضع ، وهذا صحيح كليا كما سنثبت الآن .

في اللحظة التي تترك فيها قطعة العملة يدك تكون لها سرعة الى أعلى قدرها v_0 .

بعد ذلك ترتفع قطعة العملة الى ارتفاع قدره h حيث تصبح سرعتها صفرا . لايجاد h يمكننا استخدام العلاقة :

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

لنحصل على

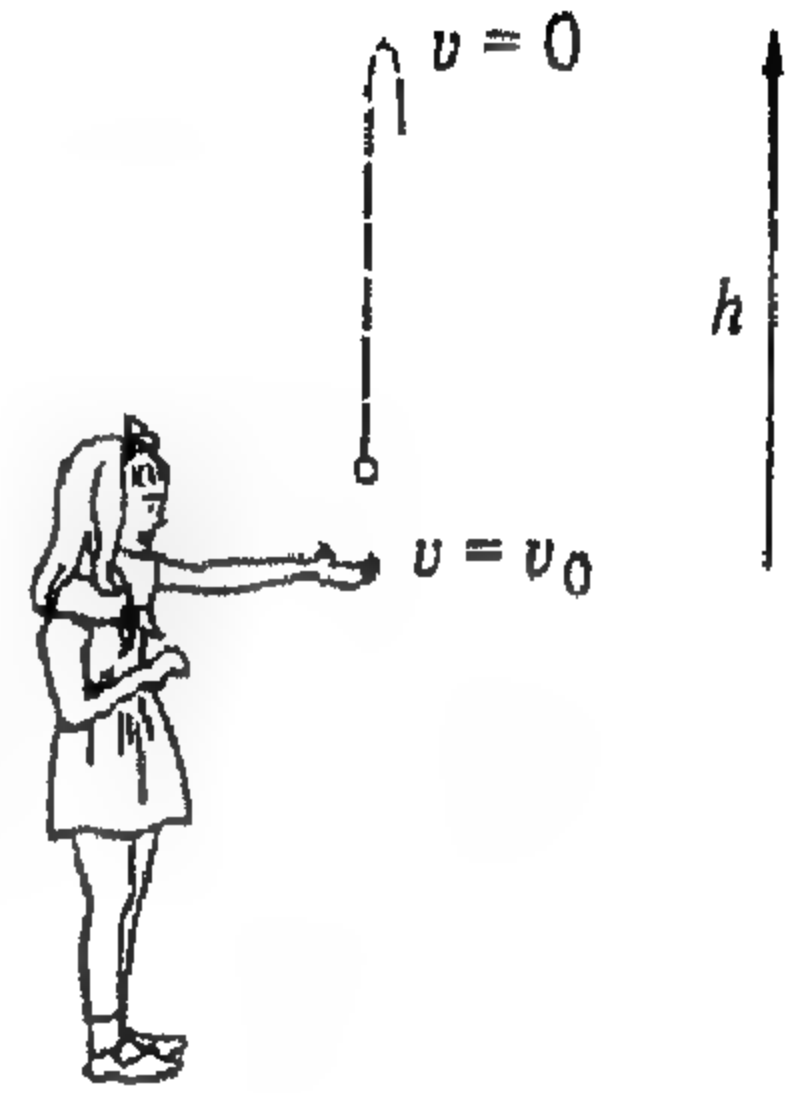
$$0 - v_0^2 = -2gh$$

ومنه نجد أن $h = v_0^2/2g$. ولكن طاقة وضعها عند هذا الارتفاع h تساوى mgh وبالتعويض عن قيمة h نحصل على :

$$mgh = mg \frac{v_0^2}{2g} = \frac{1}{2}mv_0^2$$

وكما نرى ، فإن طاقة الحركة الابتدائية لقطعة العملة قد تحولت الى طاقة وضع عندما ارتفعت قطعة العملة . لاحظ أن طاقة الحركة المفقودة قد استغلت في عمل كمية مكافئة من الشغل ضد قوة الجذب .

وبنفس الطريقة يمكننا اثبات أن السقوط الاحتكاكى لجسم يكسبه طاقة حركة مساوية لطاقة وضعه المفقودة . وهذه نتيجة عامة . وقبل صياغة هذه النتيجة ، مع ذلك ، سنحاول تعميمها لتتضمن تأثيرات القوى الأخرى . فمثلا ، يمكن أن تؤثر قوى الاحتكاك على الجسم بالإضافة الى قوة الجاذبية . كذلك فإن بعض القوى الخارجية قد تنتج قوة محصلة مؤثرة على الجسم . ماهو الصحيح في تلك الحالات ؟



شكل (٥ - ١١)

تتحول طاقة حركة قطعة العملة الى طاقة وضع عندما ترتفع قطعة العملة . وعندما تسقط تتحول طاقة الوضع مرة ثانية الى طاقة حركة

رأينا سابقا أن طاقة الحركة وطاقة الوضع يمكن أن تفقد في بذل الشغل . كذلك فإن جسما متحركا بسرعة كبيرة يمكنه أن يبذل شغلا عند إبطاء حركته . فإذا أخذنا جسما كالمبين في شكل ٥ - ٩ فسنجد أنه يبذل شغلا عندما يسقط . وفي كل من هذه الحالات تكون الطاقة المفقودة مساوية للشغل المبذول . يوجد ايضا موقف مشابه عندما تسبب قوة خارجية تسارع الجسم أو رفعه . عندئذ تكون طاقة الحركة أو طاقة الوضع مساوية للشغل المبذول بواسطة القوة الخارجية .

ويمكن تلخيص جميع هذه النتائج كما يلي :-

$$\text{Loss in KE} + \text{loss in PE} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

حيث تمثل الحروف inc و dec الزيادة والنقص على الترتيب . وهذه العبارة هي إحدى صور نظرية الشغل والطاقة . في هذه العلاقة تمثل W_{dec} مجموع كل أنواع الشغل المبذول على الجسم والتي تسبب نقص طاقة الحركة وطاقة الوضع للجسم . وفي كثير من الأحيان تكون هذه الكمية هي الشغل المبذول بواسطة قوى الاحتكاك والقوى الأخرى التي تحاول تقليل سرعة حركة الجسم . كذلك فإن الكمية W_{inc} هي مجموع كل أنواع الشغل التي تسبب زيادة طاقة حركة وطاقة وضع

نظرية الشغل
والطاقة

الجسم . وعموما فإن الشغل المبذول بواسطة القوى التى ترفع الجسم أو تسبب زيادة سرعة حركة الجسم محتوى هنا . وهذا الحد مسبوق بإشارة سالبة لأنه يسبب زيادة طاقة الجسم بدلا من نقصها . وعند كتابة كل من هذين الحدين لا يجب أن نضيف الشغل المبذول بواسطة قوة الجذب لأن هذا الشغل مأخوذ بالفعل فى الاعتبار فى حد طاقة الوضع فى الطرف الايسر للمعادلة .

تعتبر نظرية الشغل والطاقة صيغة لحقيقة أن الشغل والطاقة يمكن تقديرهما . فعندما تتغير طاقة حركة الجسم أو طاقة وضعه فإن هذا التغير لابد أن يكون نتيجة لكمية مكافئة من الشغل المبذول . ونظرية الشغل والطاقة هى أساسا معادلة اتران تبين أن هذه الكميات يجب أن تتزن كل منها مع الاخرى .

ويمكن صياغة هذه النظرية بالرموز بالطريقة التالية ، بشرط أن نتذكر أن الفاقد فى كمية معينة يساوى القيمة الابتدائية مطروحا منها القيمة النهائية :

معادلة الشغل
والطاقة

$$(6 - 5) \quad \left(\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_f^2 \right) + (mgh_0 - mgh_f) = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

لاحظ مرة اخرى ان حدى الشغل لا يحتويان على الشغل المبذول بواسطة قوة الجذب لأن هذا الشغل مأخوذ فى الاعتبار فى حد طاقة الوضع . لنحاول توضيح استخدام نظرية الشغل والطاقة بمساعدة بعض الأمثلة .

مثال توضيحي ٥ - ٧ . سقط جسم كتلته 3.0 kg مسافة قدرها 4.0 m ماهى سرعة حركته قبل أن يصطدم بالأرض مباشرة ؟

طريقة الحل . يمكننا حل هذه المسألة باستخدام معادلات الحركة . المعطيات :

$$a = 9.8 \text{ m/s}^2 \quad (\text{down positive})$$

$$v_0 = 0 \quad s = 4.0 \text{ m} \quad v_f = ?$$

وحيث أن :

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

فإن :

$$v_f^2 = (2)(9.8 \text{ m/s}^2)(4 \text{ m})$$

ومنه نجد أن :

$$v_f = 8.85 \text{ m/s}$$

الطريقة ٢ : من نظرية الشغل والطاقة (معادلة (٥ - ٦)) حيث أن قوة الجاذبية فقط هى التى تعمل ، نجد أن :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

ومنه :

$$mg(h_1 - h_2) + \frac{1}{2}m(v_0^2 - v_f^2) = 0$$

وبالتعويض عن $h_1 - h_2$ بالمقدار 4.0 m ووضع $v_0 = 0$ نحصل على :

$$(9.8 \text{ m/s}^2)(4.0 \text{ m}) + \frac{1}{2}(0 - v_f^2) = 0$$

بحل هذه المعادلة بالنسبة الى v_f نجد أن $v_f = 8.85 \text{ m/s}$

لاحظ أننا لم نحتاج الى كتلة الجسم .

مثال توضيحي ٥ - ٨ لنفرض أن الجسم في المثال السابق كان يتحرك بسرعة قدرها 6.0 m/s فقط قبل الإصطدام مباشرة . ماهو متوسط قوة الاحتكاك المؤثرة على الجسم ؟

طريقة الحل . لاحظ أنه من الضروري الآن أن نأخذ في الاعتبار الشغل المبذول بواسطة قوى الاحتكاك . وفي هذه الحالة يكون الجسم قد تحرك 4.0 m ضد متوسط قوة الاحتكاك f ، وعليه فإن الشغل المبذول بواسطة قوة الاحتكاك يساوي 4.0f Joules .

ومن نظرية الشغل والطاقة (حيث أن الاحتكاك ينقص من طاقة الجسم) نجد أن :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{friction work}$$

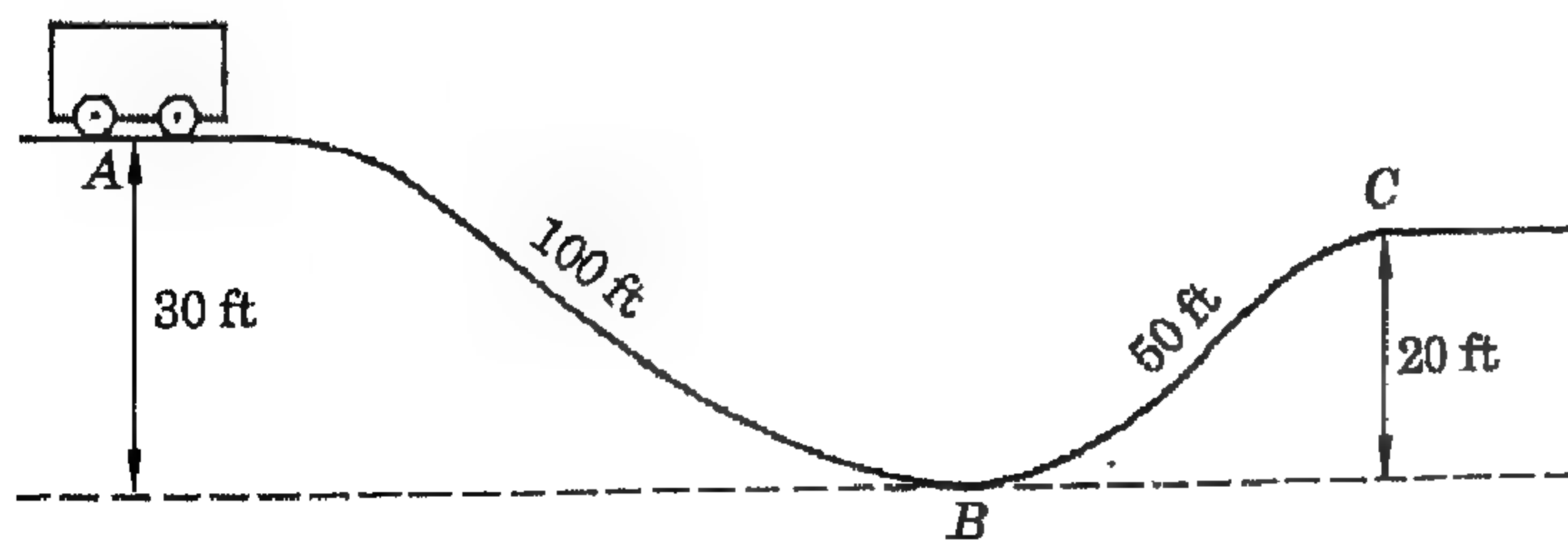
وبالتعويض نحصل على :

$$mg(h_1 - h_2) + \frac{1}{2}m(v_0^2 - v_f^2) = \text{friction work}$$

$$\text{أو : } (3.0 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(4.0 \text{ m}) - \frac{1}{2}(3 \text{ kg})(36 \text{ m}^2/\text{s}^2) = (4.0 \text{ m})f$$

لاحظ أن كتلة الجسم لم تختصر في هذه الحالة . وبحل المعادلة السابقة بالنسبة الى f نجد ان $f = 16 \text{ N}$.

مثال توضيحي ٥ - ٩ . عربة من عربات الافعوانية* وزنها 640 lb تبدأ من السكون عند النقطة A في شكل ٥ - ١٢ ثم تبدأ في الهبوط تلقائيا على القضبان . فإذا كانت قوة الاحتكاك 5.0 lb ، فما هي سرعة حركة العربة عند النقطة B ؟ وماهي سرعتها عند النقطة C ؟



شكل (٥ - ١٢)

عندما تتحرك العربة الى النقطتين B ثم C تتحول طاقة وضعها عند A جزئيا على الأقل الى طاقة وشغل ضد قوى الاحتكاك .

*الافعوانية (roller coaster) سكة حديد مرتفعة (في مدينة الملاهي) تتلوى وتنخفض وتجري فوق قضبانها عربات صغيرة .

طريقة الحل . في هذه الحالة يمكن كتابة نظرية الشغل والطاقة على الصورة :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{friction work}$$

وبتطبيق هذه العلاقة على الحركة من A الى B :

$$mg(h_A - h_B) + (0 - \frac{1}{2}mv_B^2) = (f)(100 \text{ ft})$$

ومنه نجد أن :

$$(640 \text{ lb})(30 \text{ ft}) - \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{640 \text{ lb}}{32 \text{ ft/s}^2}\right)v_B^2 = (5 \text{ lb})(100 \text{ ft})$$

وعليه فإن $v_B = 43 \text{ ft/s}$. وبالنسبة الى الحركة من A الى C تتحول معادلة الشغل والطاقة الى الصورة :

$$mg(h_A - h_C) + (0 - \frac{1}{2}mv_C^2) = (f)(150 \text{ ft})$$

وحيث أن $h_A - h_C = 10 \text{ ft}$ ، يمكننا حل المعادلة السابقة لنجد أن $v_C = 24 \text{ ft/s}$.

مثال توضيحي ٥ - ١٠ : يمثل الشكل ٥ - ١٣ سيارة كتلتها 2000 kg وسرعتها عند النقطة A حيث بدأت الانسياب هي 20 m/s . وعندما وصلت السيارة الى النقطة B اصبحت سرعتها 5.0 m/s . ماهو متوسط قوة الاحتكاك التي تعوق ، ويفرض أن قوة الاحتكاك ثابتة ، ماهي المسافة التي تقطعها السيارة بعد النقطة B قبل أن تتوقف؟

طريقة الحل . نعلم من نظرية الشغل والطاقة أن :

$$(\text{PE at } A - \text{PE at } B) + (\text{KE at } A - \text{KE at } B) = \text{friction work}$$

$$mg(h_A - h_B) + \frac{1}{2}m(v_A^2 - v_B^2) = fs$$

وبالتعويض عن الكميات المختلفة ووضع $h_A - h_B = -8 \text{ m}$ نجد أن :

$$(2000 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(-8 \text{ m}) + \frac{1}{2}(2000 \text{ kg})(375 \text{ m}^2/\text{s}^2) = (f)(100 \text{ m})$$

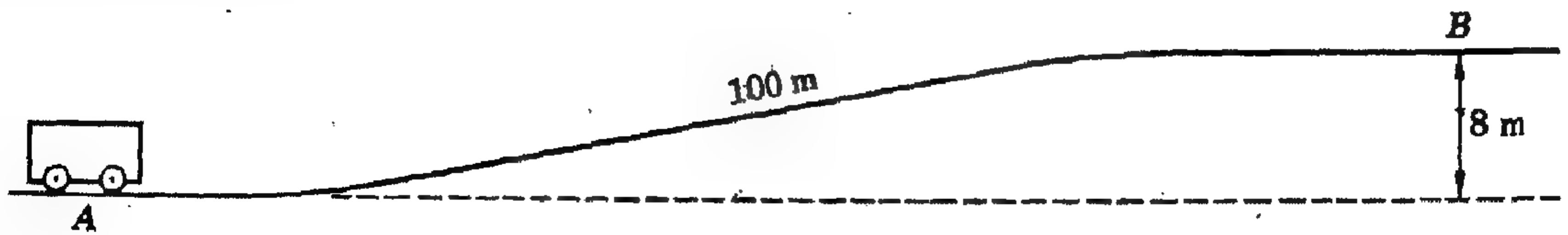
وبحل هذه المعادلة بالنسبة الى f نحصل على $f = 2180 \text{ N}$

لنطبق الآن نفس الطريقة على الحركة من النقطة B الى نقطة التوقف . حيث أن كلتا النقطتين تقعان على نفس الارتفاع فلن يكون هناك تغير في طاقة الوضع ، لذلك فإن :

$$0 + \frac{1}{2}m(v_B^2 - 0) = fd$$

شكل (٥ - ١٣)

تتحول طاقة حركة السيارة عند A جزئيا الى طاقة وضع وشغل ضد قوى الاحتكاك أثناء حركتها الى النقطة B .



حيث d هي المسافة من B إلى نقطة التوقف . وبالتعويض عن القيم المعلومة نجد أن $d = 11.5 \text{ m}$.

مثال توضيحي ٥ - ١١ : جسم صغير كتلته 2 kg يسقط من ارتفاع قدره 10 m في صندوق مليء بالرمل (أنظر شكل ٥ - ١٤) ويصل هذا الجسم الى السكون على مسافة 3.0 cm تحت سطح الرمل . ماهي قيمة متوسط القوة التي يؤثر بها الرمل على الجسم ؟

طريقة الحل . يلاحظ ان طاقة الوضع عند A قد تحولت بأكملها الى طاقة حركة عند B ، ثم فقدت طاقة الحركة هذه متحولة الى شغل احتكاك اثناء نفاذ الجسم في الرمل الى C . لنطبق نظرية الشغل والطاقة على العملية كلها من A الى C ، حيث أن $KE = 0$ عند هاتين النقطتين ، إذن :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

تصبح :

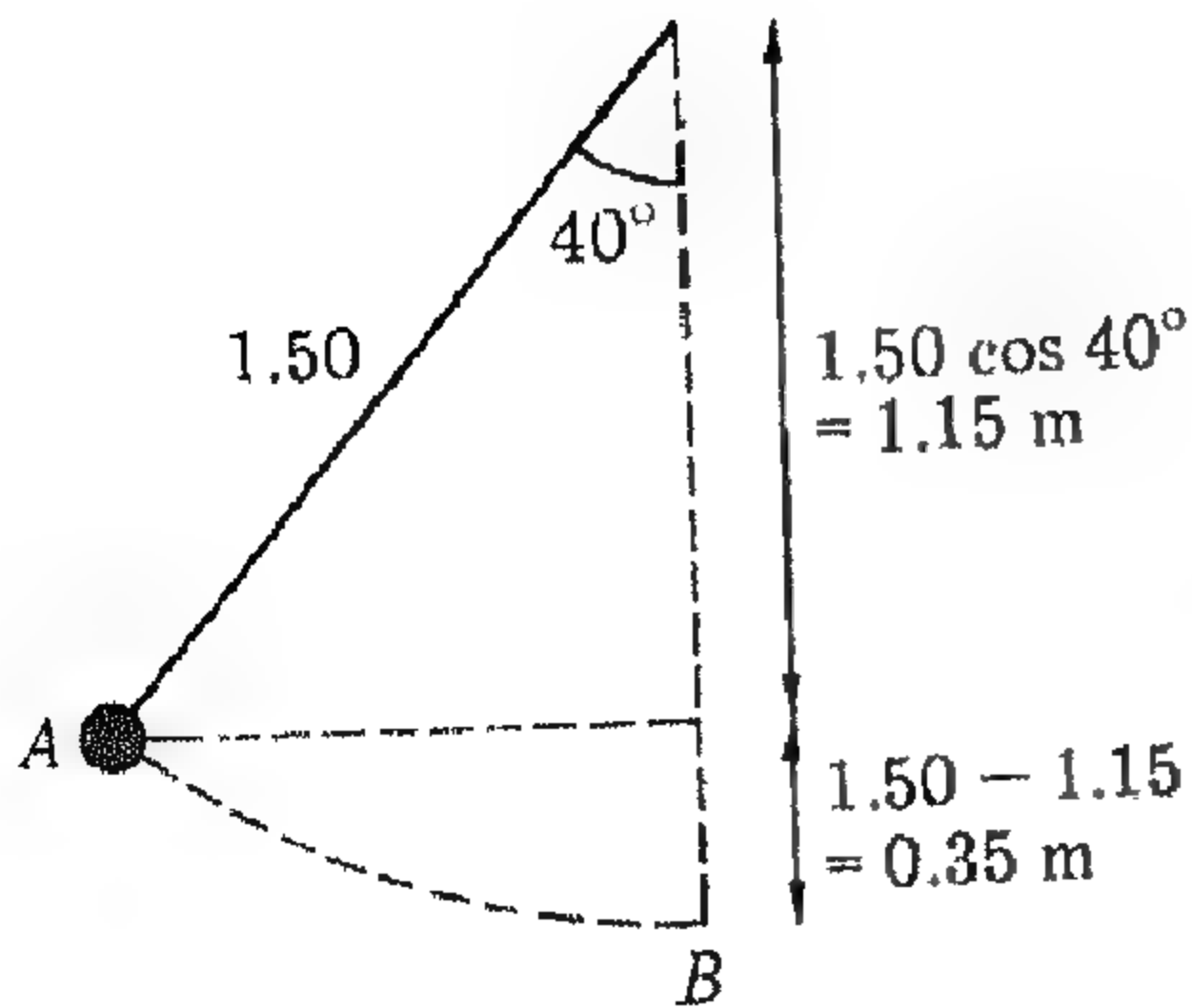
$$mg(h_A - h_C) + 0 = fs - 0$$

حيث $h_A - h_C = 10 \text{ m}$ ، $s = 0.030 \text{ m}$. وباستخدام هذه القيم نجد أن $f = 6500 \text{ N}$.

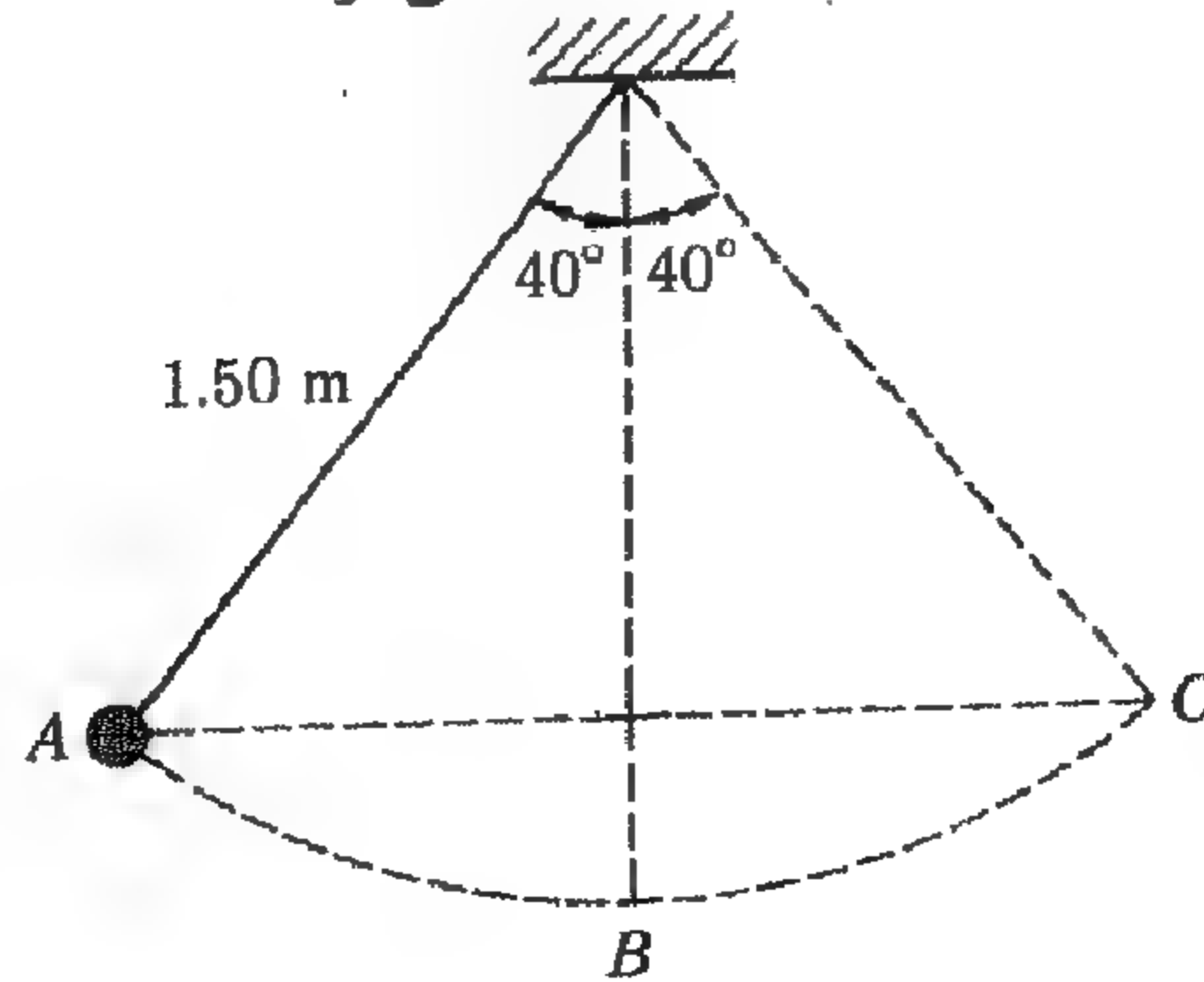
مثال توضيحي ٥ - ١٢ . تأمل البندول (كرة معلقة في نهاية خيط) الموضح في شكل ٥ - ١٥ أ . يبدأ البندول الحركة من السكون عند النقطة A ثم يترك حرا . بأي سرعة تتحرك الكرة عند النقطة B ؟ وبأي سرعة تتحرك عند النقطة C ؟

طريقة الحل . عندما تسقط الكرة من A الى B فانها تفقد طاقة الوضع . وفي هذه العملية تزداد سرعة الكرة . ويلاحظ من هذا أن جزءا على الاقل من طاقة الوضع قد تحول الى طاقة حركة . وحيث أن الشد في الخيط يتجه عموديا على القوس الذي تتحرك الكرة عليه فإن مركبة هذه القوة في اتجاه الحركة تساوى صفرا . وعليه فإن الخيط لا يبذل شغلا على الكرة . وبإهمال الاحتكاك يمكننا القول أن الشغل يبذل على الكرة بواسطة قوة الجذب فقط .

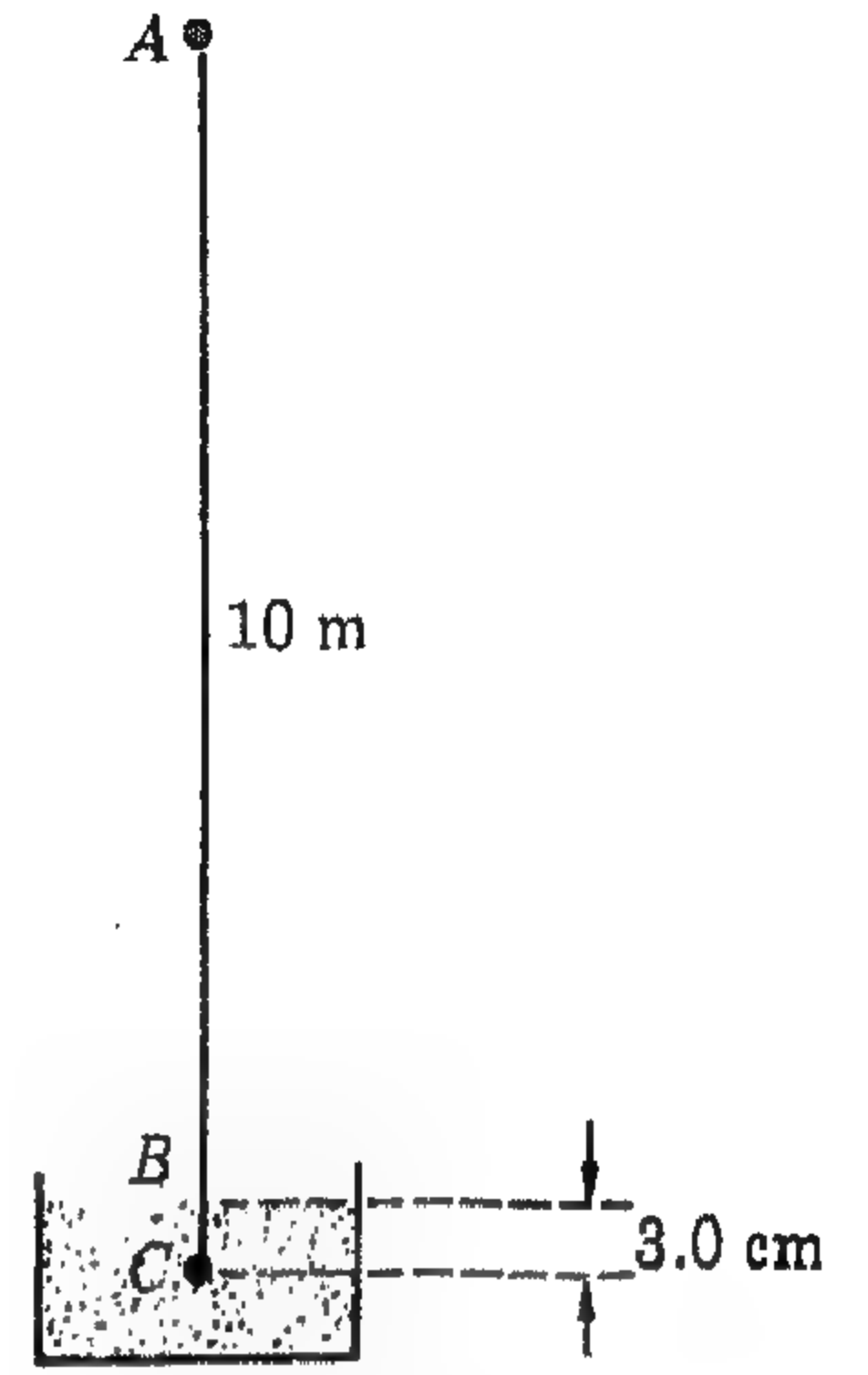
تبين لنا نظرية الشغل والطاقة ان :



(ب)



(أ) - ١٢٠ -



شكل (٥ - ١٤)
تفقد طاقة وضع الكرة متحولة الى شغل احتكاك في خلال الزمن الذي تصل فيه الكرة الى السكون عند النقطة C .

شكل (٥ - ١٥)
عندما يتأرجح البندول ذهابا وايابا فان طاقة الحركة تتحول الى طاقة وضع وبالعكس .

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

وقد وجدنا آنفا أن حد الشغل يساوى صفرا . بالإضافة الى ذلك فإن فاقد طاقة الوضع هو mgh ، حيث m كتلة الكرة و h فرق الارتفاع بين النقطتين A ، B . من شكل ٥ - ١٥ ب نرى أن $h = 0.35 \text{ m}$. وعليه فإن المعادلة السابقة تصبح :

$$m(9.8 \text{ m/s}^2)(0.35 \text{ m}) + (\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_f^2) = 0$$

ولكن السرعة الابتدائية للكرة v_0 تساوى صفرا . وعليه فإن المعادلة تصبح :

$$m(3.43 \text{ m}^2/\text{s}^2) - \frac{1}{2}mv_f^2 = 0$$

وبقسمة طرفي المعادلة على كتلة الكرة يمكننا حلها بالنسبة الى v_f لنجد أن $v_f = 2.6 \text{ m/s}$ وهذه هي سرعة الكرة عندما يمر البندول بالنقطة B .

اما الموقف عند النقطة C فانه سهل جدا . عندما تصل الكرة إلى النقطة C تكون قد اكتسبت طاقة وضعها الأصلية . وبناء على ذلك فإن طاقة الحركة عند النقطة C تساوى صفرا ، ويمكننا اثبات ذلك بتطبيق نظرية الشغل والطاقة على الكرة عند النقطتين A و C عندئذ تتحول المعادلة :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

إلى الصورة التالية (لأن قوة الجذب فقط هي التي تبذل شغلا على الكرة) :

$$0 + \text{loss in KE} = 0$$

وبتعبير آخر يمكننا القول أن طاقة الحركة واحدة عند النقطتين A و C . وحيث أن الكرة قد كانت في حالة السكون عند النقطة A فإنها تكون أيضا في حالة السكون عند النقطة C .

وكما سنرى فيما بعد ، يعتبر البندول مثالا مثيرا للتحويل المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الوضع . ومرة ثانية تتحول طاقة الحركة الى طاقة وضع وبالعكس عندما يتحرك البندول ذهابا وإيابا . وفي أى نقطة من مسار الحركة تكون طاقة الوضع المفقودة نتيجة للسقوط من النقطة A قد تحولت الى طاقة حركة . وبالطبع فإن هذا مبنى على أساس أن قوة الاحتكاك مهملة .

مثال توضيحي ٥ - ١٣ . ماهى القوة اللازمة لتسارع سيارة كتلتها 2000 kg من السكون إلى سرعة قدرها 15.0 m/s في مسافة قدرها 80 m ؟ . افترض أن متوسط قوة الاحتكاك التي تعاكس الحركة هو 500 N .

طريقة الحل . نفرض في هذه الحالة أن السيارة تتحرك على أرض مستوية بحيث يكون التغير في طاقة الوضع مساويا للصفر . عندئذ يمكن كتابة نظرية الشغل والطاقة على الصورة التالية :

$$0 + (\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_f^2) = \text{friction work} - \text{work done by accelerating force}$$

لاحظ أن قوة التسارع (ولنرمز لها بالرمز F) تسبب زيادة في طاقة حركة السيارة ، لذلك فإنها تتبع حد الشغل W_{inc} ، وكالعادة ، فإن قوة الاحتكاك تتبع حد الشغل W_{dec} لأنها تسبب نقص طاقة حركة الجسم . وبوضع $v_0 = 0$ ، $v_f = 15 \text{ m/s}$ ، $s = 80 \text{ m}$ ، $m = 2000 \text{ kg}$ تتحول هذه المعادلة الى الصورة :

$$-\frac{1}{2}(2000 \text{ kg})(15 \text{ m/s})^2 = (f)(80 \text{ m}) - (F)(80 \text{ m})$$

حيث f هي قوة الاحتكاك وتساوى 500 N وبالتعويض عن قيمة f في المعادلة السابقة وحلها بالنسبة الى F سنجد أن قوة التسارع تساوى حوالى 3300 N .

٥ - ٧ بقاء الطاقة

في هذا الفصل تعرفنا على مفهوم الطاقة أى القدرة على بذل الشغل. وكما رأينا فإن طاقة الحركة تمثل الشغل الذى يمكن أن يبذله الجسم بسبب حركته . كذلك فإن طاقة الوضع الثقالية تمثل الشغل الذى يمكن أن يبذله الجسم بسبب موضعه .

هناك أنواع أخرى من الطاقة بالإضافة الى هذين النوعين . فالسلك الزنبركى (الممدود) يستطيع بذل الشغل ، لذلك فإن له طاقة ايضا . والبطارية الموجودة فى سيارتك تستطيع إدارة بادىء التشغيل وعليه فإنها تحتوى على طاقة هى الطاقة الكيميائية . والغاز الساخن فى غرفة احتراق مكبس السيارة يمكنه أن يدفع الكباس الى الخارج مسببا حركة السيارة. لذلك فإن للغاز طاقة هى الطاقة الحرارية . هناك ايضا صور أخرى للطاقة ذات طبيعة كهربائية أو نووية . وكما ترى فإن الطاقة توجد على صور كثيرة . وسنرى فيما بعد أن الكتلة نفسها هى إحدى صور الطاقة . يوصف سلوك الطاقة بقانون فى غاية الأهمية ، وهو يسمى قانون بقاء الطاقة وينص هذا القانون على أن :

قانون بقاء الطاقة

الطاقة لا تستحدث ولا تفنى . وإذا حدث نقص فى إحدى صور الطاقة فلا بد ان تحدث زيادة فى الصور الأخرى للطاقة .

لاحظ أن هذا القانون لا ينص على بقاء طاقة الحركة أو بقاء طاقة الوضع أو حتى بقاء مجموع طاقتى الحركة والوضع . إذ أن فاقدى طاقة الحركة وطاقة الوضع يمكن أن يؤديا إلى كسب فى كثير من صور الطاقة الأخرى .

تعتبر الحالة التي تفقد فيها طاقة الحركة في بذل شغل الاحتكاك احدى اهم الحالات التي تفقد فيها طاقة الحركة . أين تذهب طاقة الحركة في مثل هذا الموقف ؟ لابد ان تظهر هذه الطاقة في صورة اخرى ، وهى بالفعل تظهر في صورة طاقة حرارية . وأنت تعلم بالتأكيد كثيرا من الأمثلة التي يؤدي فيها شغل الاحتكاك الى تأثيرات حرارية . فمثلا ، اذ لم يشحم كرسى التحميل فإن ذلك يؤدي الى تسخينه . كذلك فان الهندي الامريكى كان يشعل النار عندما يدعك قطعتين من الخشب احدهما في الأخرى . وأيضا فإن جلدك يعانى حرقا أرضيا عندما تنزلق من غير قصد على أرضية حجرة الألعاب الرياضية . وعموما فهناك كثير من الطرق التي يؤدي فيها شغل الاحتكاك إلى ظهور الحرارة ، باستثناء حالات قليلة . والحقيقة الهامة هي أنه :

عندما يبذل شغل الاحتكاك فان كمية مكافئة من الطاقة الحرارية سوف تتولد .

وكتيجة لذلك ، عندما تفقد الصور الاخرى للطاقة في بذل شغل الاحتكاك فإن كمية مكافئة من صورة أخرى من الطاقة سوف تكتسب ، فالطاقة لا تستحدث ابدا ولا تفنى ابدا .

من السمات الهامة لقانون بقاء الطاقة تلك السمة المتعلقة بمكنات الحركة الدائمة . فمثلا ، قد يقترح بعض المخترعين من آن الى آخر تصميمات لمكنة الحركة الدائمة . وقد تكون هذه آلية عبقرية . تلك التي يقترح المخترع أنها ستدير السيارة إلى الأبد بدون وقود أو ، بتعبير أكثر دقة ، قد تكون هذه عبارة عن مكنة تستخدم الوقود للبدء ولكنها تولد القدرة في داخلها . وقد يدعى المخترع أن هذه المكنة تولد كمية من الطاقة كافية لتحفظها دائرة وقادرة على بذل الشغل بالإضافة إلى ذلك .

وإذا كنا على علم بقانون بقاء الطاقة يمكننا أن نقول بدون تفكير أكثر إن هذه المكنات لن تعمل . ومهما كانت هذه المكنات معقدة لن تستطيع أن تخلق الطاقة . فإذا فقدت هذه المكنات الطاقة بأية طريقة ، بالاحتكاك أو ببذل الشغل ، سيكون من الضروري امداد المكنة بالطاقة من مصدر داخلي أو خارجي . وحيث أن أية مكنة تحتوى على قدر ما من الاحتكاك ، فإنها لن تدور إلى الأبد مالم تمد بالطاقة من مصدر آخر .

هناك كثير من التطبيقات المثيرة الأخرى لقانون بقاء الطاقة وهو قانون هام جدا ينطبق انطباقا واسعا في جميع فروع العلم وسنستخدم نحن هذا القانون في كثير من الأحيان أثناء دراستنا لعلم الفيزياء .

٥ - ٨ رصيد طاقة الأرض

من المعلوم جيدا أن سكان الأرض قلقون على مصدر طاقة الأرض . وحيث أن الطاقة محفوظة ، يمكننا أن نفترض أن المشاكل تنبع من استخداماتنا المتزايدة للطاقة . ومع ذلك فإن هذا ليس صحيحا إذ أن نقص الطاقة المحتمل في المستقبل سيحدث حتى إذا واصلنا استخدام الطاقة بنفس المعدل الحالي . ذلك لأن المشكلة تتعلق بنفع الطاقة الموجودة على الأرض وليس فقط بكمية الطاقة الموجودة عليها .

سيناقش موضوع نفع الطاقة بتفصيل أكثر في الفصل الثاني عشر ولكن تكفيينا الآن بعض الأمثلة لتوضيح المشكلة الأساسية . لنأخذ حالة بسيطة وهي احتراق الفحم أو النفط أو البنزين لتوليد بخار الماء الذي يستخدم بدوره في توليد الكهرباء . عند احتراق الوقود يتحول جزء صغير من الطاقة الكيميائية في الفحم الى طاقة كهربائية . أما الجزء الأكبر من الطاقة الحرارية الناتجة عن الاحتراق فإنه يتصاعد خلال المدخنة مع نتائج الاحتراق . كذلك فإن هناك مفقودات أخرى من الطاقة الحرارية . وفي الحقيقة ، كما سنرى في الفصل الثاني عشر من المستحيل حتى من الناحية النظرية تحويل حرارة الاحتراق بأكملها الى شغل نافع . ونتيجة لذلك يمكننا القول أن طاقة الوقود ليست صالحة بأكملها للاستعمال .

لنأخذ مثالا آخر لتوضيح هذه الظاهرة . لنفرض أنك اعطيت كتابا طاقة حركة وذلك بدفعه على المنضدة . (يمكنك في هذه الحالة أن تعتبر أن هذه الطاقة قد أتت منك وأنك قد حصلت عليها من الطعام الذي أكلته) . عندئذ سيفقد الكتاب هذه الطاقة بسرعة بسبب شغل الاحتكاك لتظهر كطاقة حرارية في صورة تسخين لسطحي الإنزلاق، أى أن طاقة الحركة الابتدائية قد تحولت الى صورة أخرى من الطاقة ولكن هذه الطاقة الجديدة أقل نفعا من طاقة الحركة الابتدائية للكتاب . وهذه ظاهرة واسعة الانتشار في الطبيعة تتحول الطاقة من صورة نافعة الى صورة أقل نفعا - ولهذا السبب فإن طاقة الأرض تصبح أقل نفعا بمرور الزمن بالرغم من أن كمية الطاقة الكلية لاتقل كثيرا .

وفي الحقيقة ، ربما تكون كمية الطاقة الموجودة على الأرض متزايدة باستمرار بسبب الطاقة الآتية اليها من الشمس ، ولكنها بالتأكيد لاتتناقص .

هناك مصدران رئيسيان لطاقة الأرض ، وقد وجد احدهما في السنوات المبكرة عندما كانت الأرض في بداية تكونها حينما كانت العناصر الموجودة على الأرض في طور التكوين . ونظرا لأن هذه الطاقة محبوسة في ذرات وأنوية هذه العناصر فإنها تعرف باسم الطاقة النووية ، وتستخدم هذه الطاقة في

المفاعلات النووية . وقد بدأ استخدام هذا المصدر على نطاق واسع في الآونة الأخيرة فقط . ومن المأمول أن يمدنا هذا المصدر بجزء كبير من الطاقة اللازمة لاحتياجاتنا لقرون عديدة قادمة ، ويعتمد ذلك على الانجازات التكنولوجية في المستقبل . (وهو أيضا مصدر الحرارة الموجودة في اعماق الأرض والتي تعتبر اساسية في عمل مصادر الطاقة الحرارية الأرضية) .

أما المصدر الاساسي الثاني لطاقة الأرض فهو الشمس . وتأتي كل الطاقة الحالية تقريبا من المصدر ، فالنفط والفحم والبنزين ماهي الا نواتج تحلل المادة النباتية التي تنمو في ضوء الشمس مستمدة منه الطاقة النافعة . ونحن نبدأ الآن استخدام ضوء الشمس مباشرة في التسخين الشمسي والخلايا الشمسية لانتاج الكهرباء .

وحتى الطاقة التي نحصل عليها من الوحدات الايدروكهربائية لتوليد الطاقة تأتي من الشمس بطريقة غير مباشرة ويتم ذلك بالطريقة الاتية . يتبخر الماء من البحيرات والمحيطات الموجودة على سطح الأرض نتيجة لحرارة الشمس ، ثم يسقط بخار الماء مرة ثانية على الأرض في صورة مطر أو جليد ، وكثيرا ما يحدث هذا في المناطق المرتفعة عن مستوى سطح البحر . وعندما يفقد الماء طاقة الوضع الثقالية أثناء سقوطه إلى البحار ، يمكننا أن نجعله ييدل شغلا بادارة التربينات والمعدات المشابهة .

هناك مصادر ثانوية اخرى لطاقة الأرض . فالمد والجذر مثلا هما نتيجة لتأثيرات الجاذبية التي يؤثر بها القمر على الأرض . والرياح والتيارات المحيطية وفروق درجات الحرارة في المحيطات وغيرها هي أيضا مصادر ممكنة للطاقة ، ولكن لايعتمد عليها في الوقت الحالي .

نرى من ذلك اذن أن الأرض تتلقى الطاقة من مصدرين رئيسيين وهما مصادر الطاقة النووية والشمس ، (وفي الواقع فإن الشمس ايضا هي مصدر طاقة نووية ، وسيناقش ذلك بتفصيل اكثر في الفصل الثامن والعشرين) . ولكن الطاقة المحبوسة الآن في الوقود الاحفوري (النفط والبنزين والفحم) ، ستصبح اقل قابلية للاستعمال عندما تتغير صورتها الكيميائية الحالية . ونحن نأمل أن يسد النقص في هذا المصدر جزئيا بزرع مواد الوقود كالنباتات والطحالب ... الخ في ضوء شمس . اما مصادرنا النووية للطاقة فإنها ضخمة جدا ، ويبدو أننا سنكون قادرين في آخر الأمر على الإفادة منها على مستوى واسع . ولكن هذه المصادر أيضا سوف تستنفد في خلال بضع عشرات من آلاف السنين . وحتى الشمس ذاتها سوف تصبح مصدر طاقة ضئيل القيمة في مدى بضعة بلايين من السنين . وسنناقش هذه الموضوعات وموضوعات أخرى مماثلة في الفصل الأخير من هذا الكتاب .

٥ - ٩ المكّنات

يمكن أن يسمى أى جهاز ميكانيكى تقريبا يساعدنا على بذل الشغل بالمكّننة وتقع معظم هذه الأجهزة فى واحد من ثلاثة أصناف عامة . هناك نوع هام جدا من المكّنات وهو الذى يمكننا من رفع حمل ثقيل جدا باستعمال قوة صغيرة نسبيا . ومن أمثلة هذا النوع المكّنات رافعة السيارة والمطرقة الخلفية والبكرة المركبة . وهذا على سبيل المثال وليس الحصر .

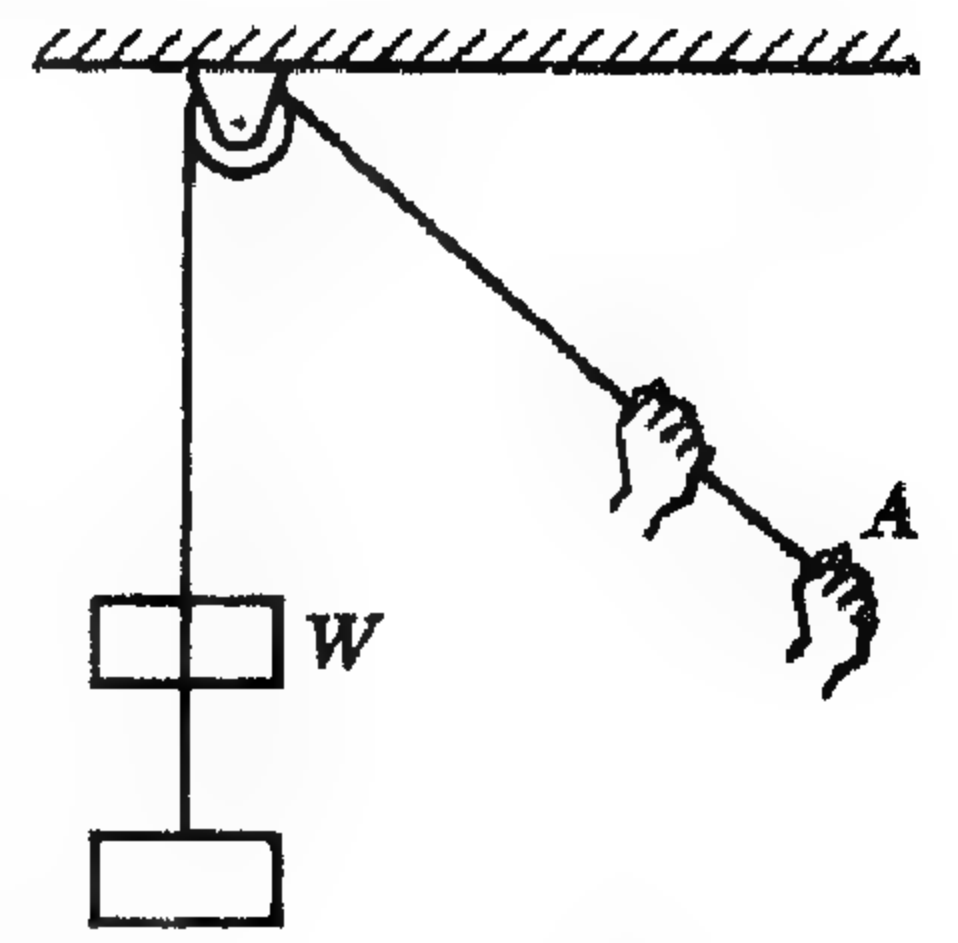
ويستخدم النوع الثانى من المكّنات فى تحريك جسم بسرعة كبيرة جدا بالرغم من أن عامل نقل الحركة يكون متحركا بسرعة بطيئة نسبيا . وكمثال لهذا النوع يمكننا أن نذكر مجموعة البكرات أو التروس التى تحول دوران عمود الدخّل الى دوران أسرع كثيرا لعمود الخارج .

النوع الثالث من المكّنات يساعد على جعل عملية بذل الشغل أكثر ملاءمة ليس غير . ومن أمثلة هذه المكّنات البكرة الأحادية المبينة بالشكل ٥ - ١٦ ، فمن الملائم للشخص عادة أن يجذب الحبل الى أسفل عند A لكى يرفع الثقل W الى أعلى عن أن يجذبه مباشرة الى أعلى . كذلك فإن الجهاز الذى يمكن شخصا ما من تحريك جسم يبعد عنه مسافة معينة هو مثال آخر لمكّننة من هذا النوع العام .

أن أيا من هذه المكّنات لا يستطيع أن يبذل شغلا أكبر من الشغل الذى يبذله العامل الحافز على المكّننة . ونحن نعلم أن هذا صحيح بدون فحص المكّننة بالتفصيل لأن الطاقة محفوظة فى هذه الأجهزة . فإذا كان الشغل الذى تستطيع المكّننة بذله أكبر من الشغل المبذول على المكّننة لإدارتها لكانت المكّننة قادرة على خلق الشغل بداخلها ، وبالطبع فإنها لا تستطيع ذلك . بالإضافة الى هذا فإن أية مكّننة عملية تحتوى دائما على قدر من الاحتكاك ، لذلك فإن جزءا من الطاقة سوف يفقد فى بذل شغل الاحتكاك داخل المكّننة . وعليه فإن الشغل اللازم بذله على المكّننة لأبد أن يكون من الشغل المطلوب بذله بدون المكّننة . وأغراض استخدام المكّنات هى عادة الأغراض الثلاثة المذكورة سابقا . ولكن يجب أن نتذكر جيدا أن أية مكّننة لا يمكن أن تبذل شغلا أكبر من الشغل المبذول عليها لإدارتها .

٥ - ١٠ مكّننة الصندوق الأسود

هناك مميزات معينة مشتركة لجميع المكّنات . ولكى نصف عمل المكّنات بوجه عام من المناسب أن نتخيل أن المكّننة موجودة فى صندوق أسود بحيث لاتصرف آلياتها انتباهنا . وهذا الموقف موضح فى شكل ٥ - ١٧ .

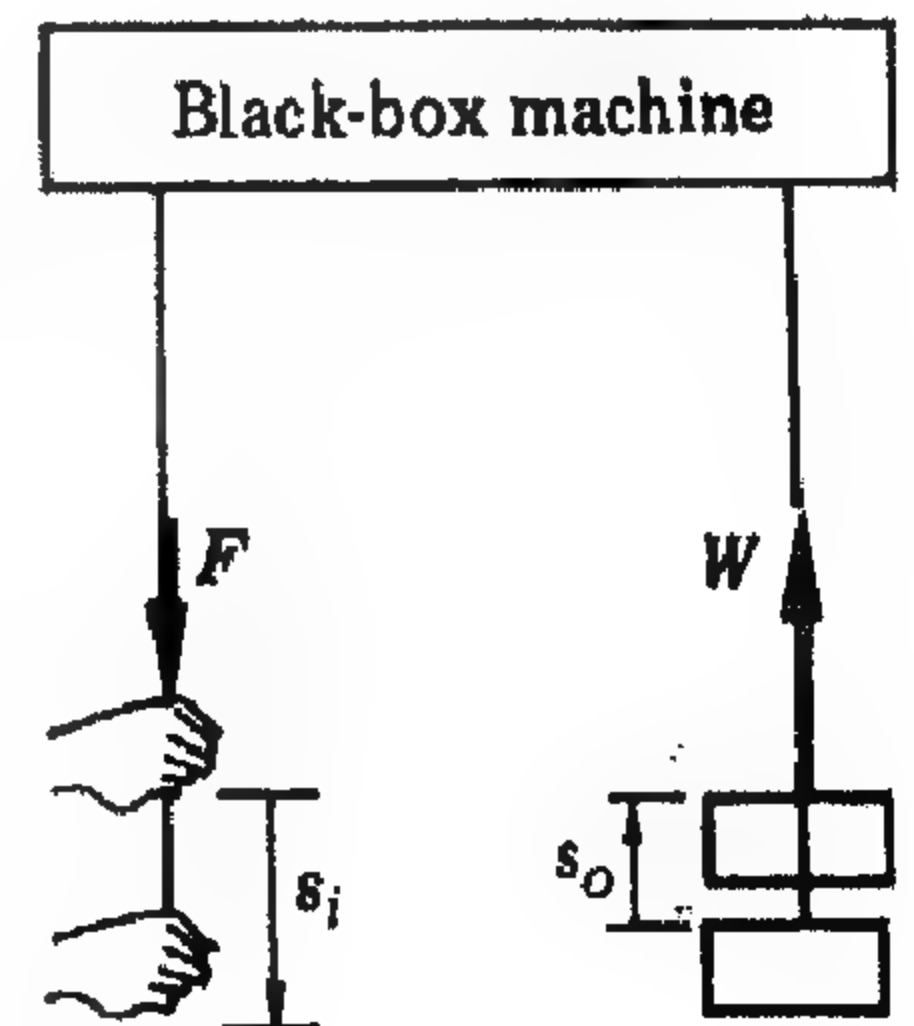


شكل (٥ - ١٦)

يقوم هذا النوع الموضح من المكّنات بتغيير اتجاه القوة المسلطة ليس غير . وبذلك تصبح عملية رفع الجسم ملائمة أكثر .

شكل (٥ - ١٧)

يمكننا تعيين IMA و AMA لهذه المكّننة وكذلك كفاءتها بمعلومية F ، W ، s_o ، s_i .



في هذه المكنة يمثل الحبل الأيسر طرف الدخول والحبل الأيمن طرف الخرج . عندما يجذب شخص ما الحبل الأيسر بقوة حافزة قدرها F فإن المكنة تدور . عندئذ يبدل طرف الخرج شغلا يرفع الجسم الذي وزنه W الى أعلى .

لوصف خصائص هذه المكنة تماماً من الضروري إجراء نوعين من التجارب فقط عليها . (١) يجب قياس المسافة التي تتحركها نقطة عمل قوة الدخول s_i ، عندما يرفع الثقل مسافة قدرها s_o بواسطة طرف الخرج . وبأسلوب آخر ، يجب قياس الطول s_i من الحبل الأيسر الذي يخرج من المكنة عندما يدخل طولاً قدره s_o من الحبل الأيمن داخل الصندوق . (٢) يجب قياس القوة الواجب تسليطها على طرف الدخول لرفع حمل معلوم . تبين أولى هاتين التجريبتين الحمل الذي تستطيع المكنة رفعه باستخدام قوة قدرها F وكذلك عما إذا كان بالمكنة احتكاك ام لا . وحيث أن الطاقة التي وضعت في المكنة Fs_i تستخدم بأكملها بواسطة المكنة في بذل شغل نافع يرفع إلى أعلى فإن :

$$Fs_i = Ws_o \quad \text{في الحالة المثالية ، بدون احتكاك}$$

ومن هذه المعادلة ينتج أن :

$$\frac{W}{F} = \frac{s_i}{s_o} \quad \text{بدون احتكاك}$$

وحيث أن النسبة بين وزن الحمل المرفوع W والقوة اللازمة لرفعه F هي مقياس لفائدة الفائدة رفع الثقل للمكنة ، نقول أن الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) لها تعطي بقيمة هذه الميكانيكية النسبة في حالة عدم وجود احتكاك ، أي s_i/s_o . وعليه ، بالنسبة لأي مكنة :

$$IMA = \frac{s_i}{s_o} \quad (٧ - ٥)$$

وتعني المعادلة (٧ - ٥) مايلي . إذا فحصت مكنة ما ووجد أن قوة الدخول تتحرك مسافة قدرها 10 ft عندما يرتفع الحمل مسافة قدرها 2 ft فإن :

$$IMA = \frac{10 \text{ ft}}{2 \text{ ft}} = 5$$

وهذا يعني أنه إذا لم يكن بالمكنة أي احتكاك فإنها تستطيع رفع جسم وزنه 500 lb باستعمال قوة دخل قدرها 100 lb . لاحظ أن المكنة لا تستطيع أن تبذل شغلا أكبر من الشغل الذي يزودها به العامل الحافز حتى في هذه الحالة المثالية . وبالرغم من أن قوة الخرج تساوي خمسة أضعاف قوة الدخول فإن قوة الخرج تحرك الجسم فقط خمس المسافة التي تتحركها قوة الدخول . أي أن القوة تضاعف بواسطة المكنة ولكن ليس الطاقة .

وبالطبع فإن المكنة الحقيقية ليست عديمة الاحتكاك كلية . لذلك فإننا نحتاج الى تجربة تبين لنا هذه السمة من سمات المكنة، وهي التجربة الثانية المذكورة سابقا والتي نقيس فيها القوة F اللازمة لرفع الوزن W . في هذه الحالة تسمى بالنسبة W/F بالفائدة الميكانيكية الفعلية أو الحقيقية (AMA) للمكنة وعليه ، فإن :

الفائدة الميكانيكية الفعلية

$$(٨ - ٥) \quad AMA = \frac{W}{F}$$

وبالطبع فإن AMA لابد أن تكون اصغر من IMA لأن الاحتكاك سيقلل الحمل W الممكن رفعه بنفس القوة المسلطة F .

تعريف تعرف كفاءة المكنة أو العملية بالنسبة بين شغل الدخول وشغل الخرج . وحيث أن هاتين الكميتين هما Ws_o و Fs_i على الترتيب ، فإن :

$$\text{الكفاءة} = \frac{Ws_o}{Fs_i} = \frac{W/F}{s_i/s_o}$$

$$(٩ - ٥) \quad \text{الكفاءة} = \frac{AMA}{IMA} \quad \text{اذن : كفاءة المكنة}$$

وذلك بناء على المعادلتين (٧ - ٥) و (٨ - ٥) ، وإذا لم يكن هناك احتكاك فإن AMA و IMA سيكونان متماثلين وبالتالي فإن الكفاءة ستساوى 1.00 أو ، كما يقال عادة 100 في المائة . ومن ناحية أخرى ، إذا كان $AMA = 4$ ، $IMA = 5$ ، فإن الكفاءة ستكون $4/5$ وهو يساوى 0.80 أو 80 في المائة .

لاحظ ان الكميات الاساسية للمكنة وهي AMA ، IMA والكفاءة تعرف بنفس الطريقة لجميع المكنات . ولدراسة هذه الكميات في مواقف معينة يجب علينا الآن فحص الأشغال الداخلية لمكنات مختلفة .

٥ - ١١ البكرة البسيطة

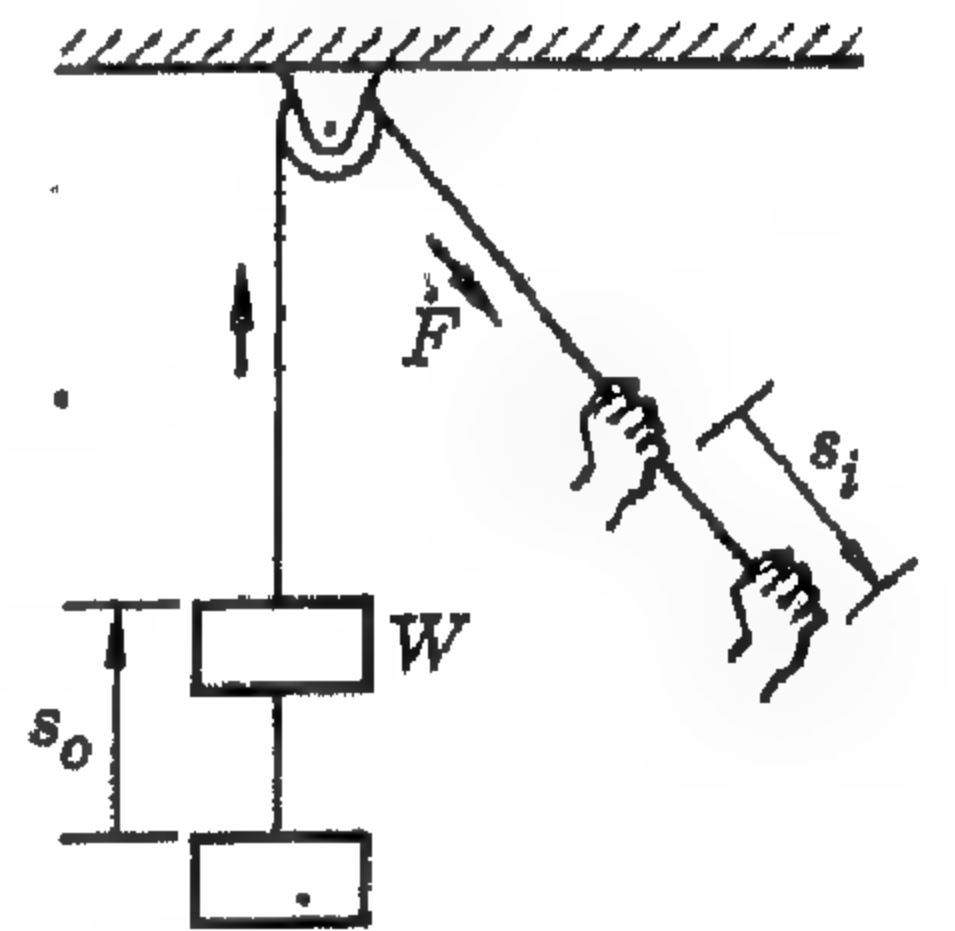
الكرة البسيطة هي المكنة المبينة بالشكل ٥ - ١٨ ، وتتكون من حبل يلتف مرة واحدة على عجلة مركبة على محور العجلة . وحيث أنه يفترض أن الحبل لا يتمدد ، فإذا جذبت القوة F الحبل مسافة s_i ، فإن الجسم الذي وزنه W سيرتفع مسافة قدرها $s_o = s_i$. يمكننا إذن كتابة المعادلة (٧ - ٥) لهذه المكنة على الصورة :

$$IMA = \frac{s_i}{s_o} = 1.00$$

تعتمد الفائدة الميكانيكية الفعلية للمكنة على الاحتكاك في البكرة . وبالنسبة لبكرة بسيطة مثل هذه البكرة يمكننا جعل الاحتكاك صغيرا للغاية . وعليه فإن قيمة AMA ستكون قريبة جدا من قيمة IMA . وبالرغم من ذلك فإنها لا يمكن أبدا أن تساوى 1.00 . لذلك فإن كفاءة المكنة ستكون اقل قليلا من 100 في المائة .

مثال توضيحي ٥ - ١٤ . في الجهاز المبين بشكل ٥ - ١٨ تلزم قوة قدرها 50 lb لرفع الجسم الذي وزنه 40 lb . ماهي كفاءة المكنة ؟

طريقة الحل : من تصميم المكنة يتضح أن $s_i = s_o$ ، وعليه فإن $IMA = 1.00$. وتبين المعطيات أن $AMA = 40 \text{ lb} / 50 \text{ lb}$ إذن :



شكل (٥ - ١٨)
عند استعمال البكرة بالطريقة
المبينة تكون IMA لها مساوية
للوحدة .

$$\text{Efficiency} = \frac{0.80}{1.00} = 0.80$$

أو :

80%

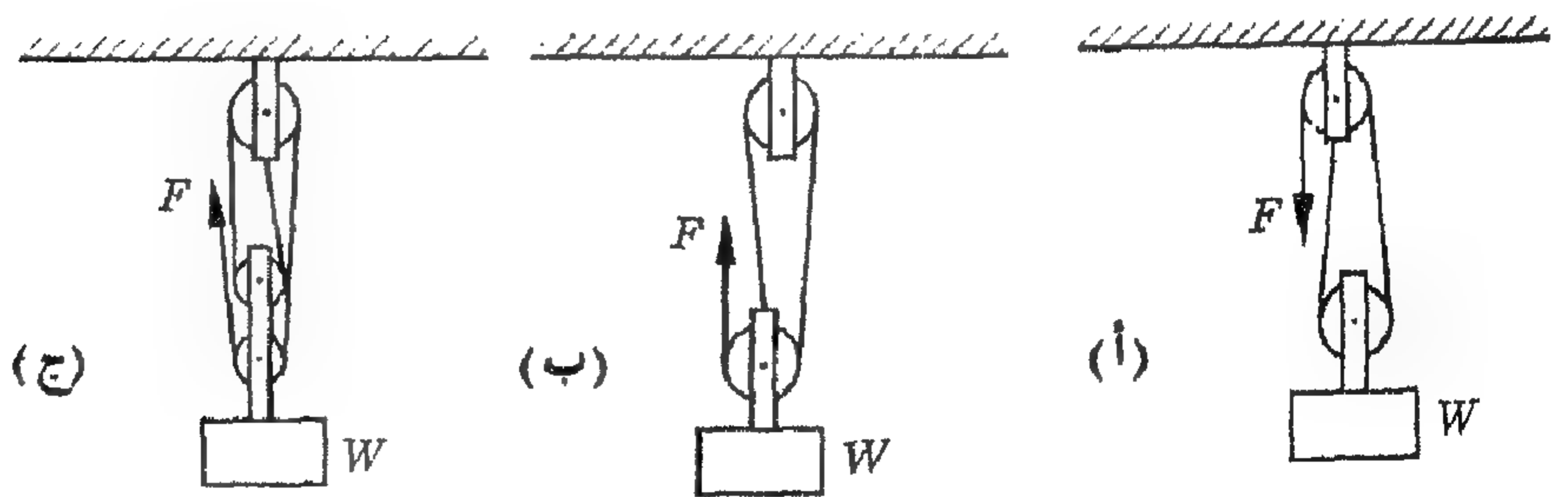
٥ - ١٢ أجهزة أخرى من البكرات

يمثل الشكل ٥ - ١٩ حالة بكرة واحدة قابلة للتحرك . لاحظ أن القوة F يجب أن تجذب الحبل 2 ft إلى أعلى لكل قدم يتحركه الحمل إلى أعلى . وهذا نتيجة لأنه عندما تتحرك البكرة مسافة 1 ft مقتربة من السقف ، فإن كلا الحبلين الأيمن والأيسر والمتجهين إلى السقف سيقصران بمقدار 1 ft . وهذا يعني أنه يجب حذب الحبل إلى أعلى خلال الثقب مسافة بمقدار 2 ft لكي يقصر طول الحامل بمقدار 1 ft .

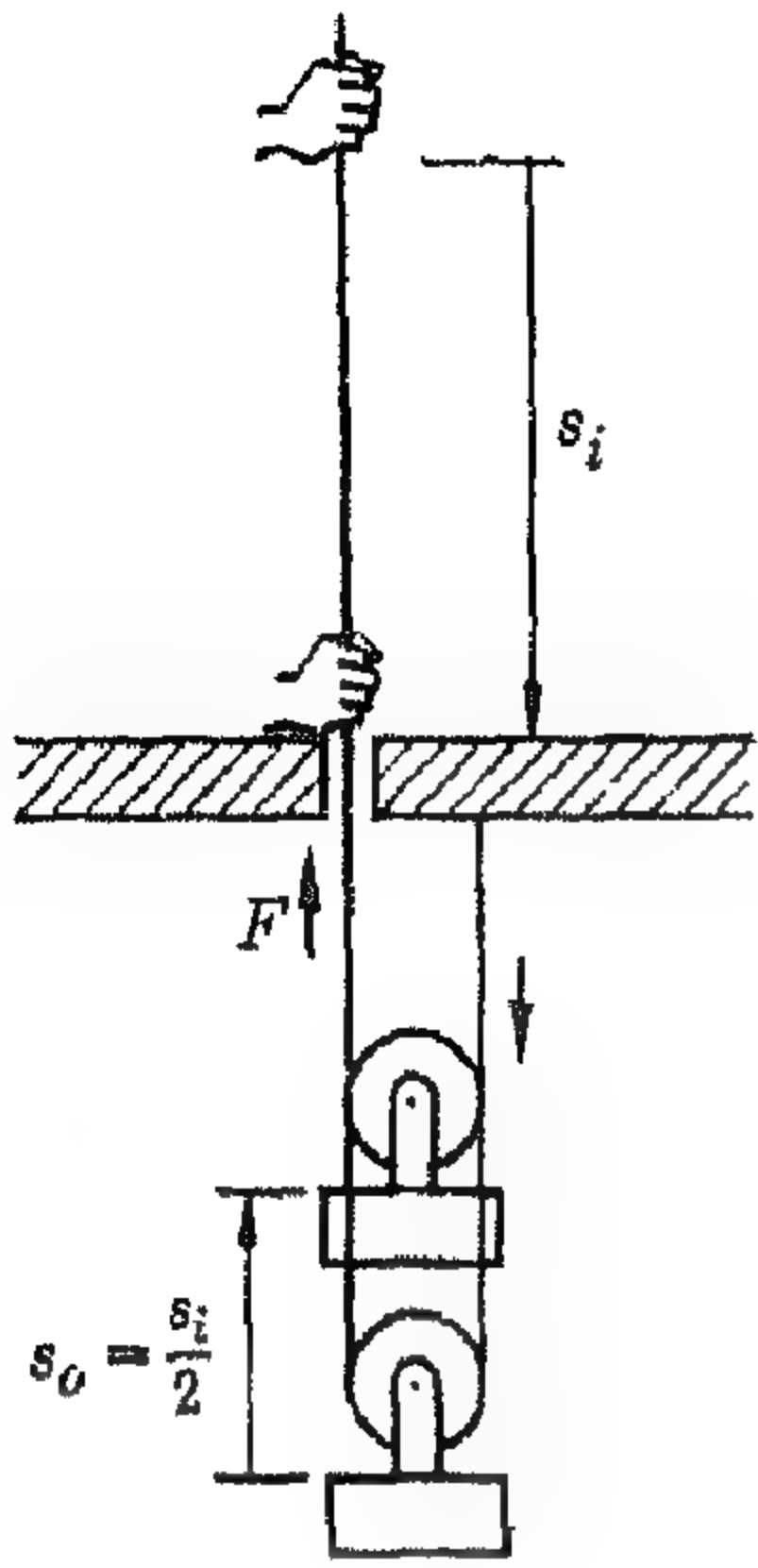
اذن $s_i = 2s_o$ بالنسبة لهذه المجموعة ، وعليه فإن :

$$\text{IMA} = \frac{s_i}{s_o} = 2.00$$

من الواضح أنه إذا لم تكن المجموعة متحركة فإن كلا الحبلين سيجذبان البكرة والثقل إلى أعلى . وعليه فإذا كانت البكرة عديمة الوزن فإن الشد في كل حبل سيكون $W/2$ ، بحيث يكون الشد المشترك المؤثر على البكرة مساويا للوزن W . في هذه الحالة ستكون F مساوية للمقدار $W/2$. وفي الواقع فإن F يجب أن تكون بالطبع كبيرة بدرجة كافية لكي يتحمل الحبلان أيضا وزن البكرة ولكي تتغلب على تأثير الاحتكاك كذلك ، وعليه فمن المستحيل أن تكون $\text{AMA} = 2.00$ لهذه المكنة . فإذا كان وزن البكرة يساوي W تقريبا فإن كفاءة المكنة ستكون صغيرة جدا حتى إذا كان الاحتكاك في البكرة نفسها صغيرا جدا . ومع ذلك فإن هذا يعتبر تحسينا بالمقارنة بالحبل الواحد في كثير من الوجوه .



يمثل الشكل ٥ - ٢٠ مجموعات أكثر تعقيدا من البكرات . باستخدام نفس أسلوب التفكير الذي اتبع في الحالة السابقة يمكننا أن نثبت أن IMA للأجهزة (أ) ، (ب) ، (ج) تساوي 2 ، 3 ، 4 على الترتيب . لاحظ في هذه الحالة ، وكذلك في الحالة الموضحة في شكل ٥ - ١٩ ، أن IMA تساوي عدديا عدد الحبال التي تجذب البكرة الحرة إلى أعلى . وهذه الحقيقة تمدنا بقاعدة بسيطة لتحديد IMA لمثل هذه البكرات .



شكل (٥ - ١٩)

IMA لهذا الجهاز من البكرات يساوي 2 ، لأن القوة المسلطة تتحرك مسافة تساوي ضعف المسافة التي يتحركها الحمل .

شكل (٥ - ٢٠)

قيم IMA للمجموعات المبينة في الشكل هي 2 ، 3 ، 4 ، على الترتيب . لاحظ أيضا أن هذه القيم هي عدد الحبال التي تجذب البكرة حاملة الثقل إلى أعلى .

٥ - ١٣ العجلة ومحور العجلة

يتكون الجهاز المبين بالشكل ٥ - ٢١ من حبل دخل ملفوف حول عجلة كبيرة نصف قطرها b ومحور العجلة الملفوف عليه حبل يحمل الثقل المطلوب رفعه الى أعلى . لنفرض أن نصف قطر محور العجلة a أصغر كثيرا من b .

لايجاد IMA لهذه المكنة البسيطة ، تأمل ما يحدث عند دوران العجلة ومحورها دورة واحدة في عكس اتجاه عقارب الساعة . عندئذ سيفك حبل الدخول طولاً يساوى محيط العجلة . اذن :

$$s_i = 2\pi b$$

أما الحبل الذى يحمل الثقل فانه سيلتف لفة واحدة حول محور العجلة رافعا الثقل مسافة تساوى تماما طول محيط محور العجلة . اذن :

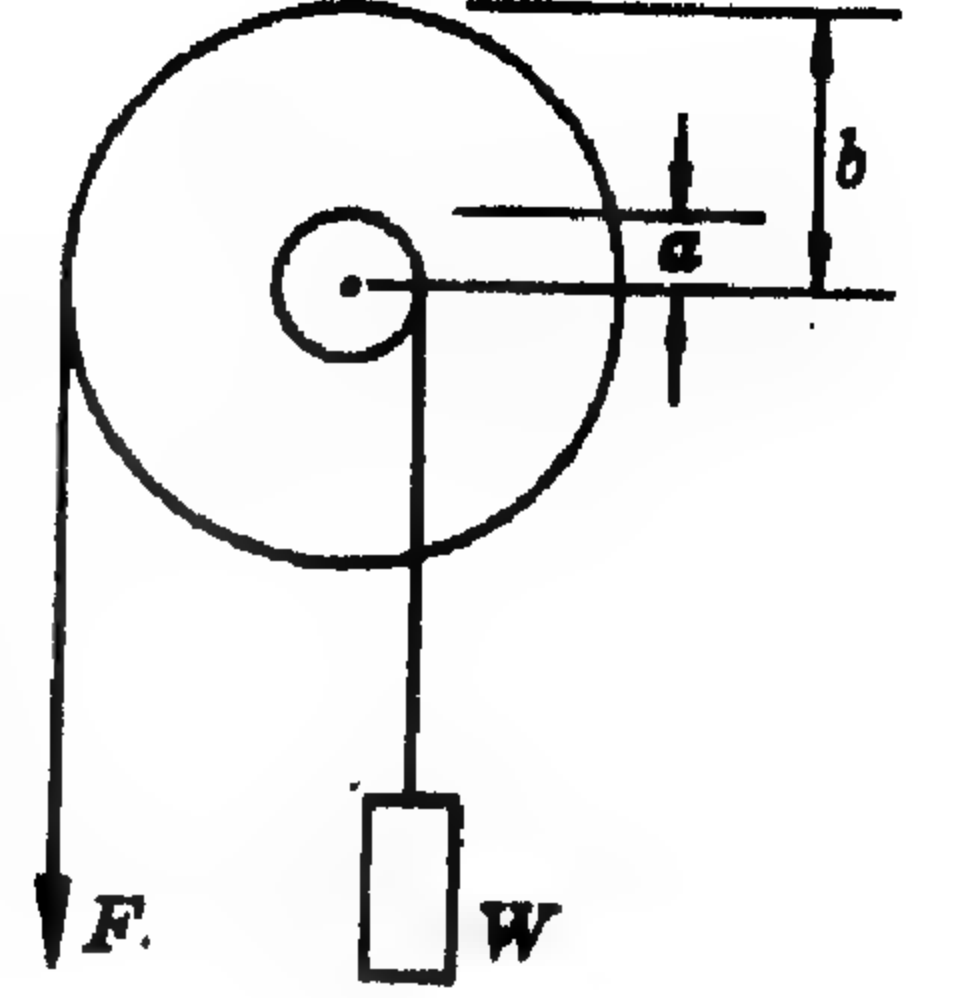
$$s_o = 2\pi a$$

وعليه فإن :

$$IMA = \frac{s_i}{s_o} = \frac{b}{a}$$

هذه المكنة نافعة للغاية لأن الإحتكاك الملازم لها صغيرا وعلاوة على ذلك يمكننا

أن نجعل b أكبر كثيرا من a . ومن المؤلف أن يكون $a = \frac{1}{2}$ in ، $b = 12$ in . عندئذ ستكون قيمة IMA لهذه المجموعة هي 24 ، وهى قيمة كبيرة جدا للفائدة الميكانيكية لمثل هذا الجهاز البسيط .



شكل (٥ - ٢١)

تعطى قيمة IMA للعجلة ومحورها بالنسبة بين نصف قطر العجلة ونصف قطر محور العجلة .

ملخص

يعطى الشغل المبذول بواسطة القوة F على جسم ما عندما يتحرك هذا الجسم إزاحة قدرها S في خط مستقيم بالعلاقة $Work = Fs \cos \theta$ ، حيث θ هى الزاوية بين F و S . وبدلالة مركبة F في اتجاه S يعطى هذا الشغل بالعلاقة $W = F_s S$. وحدات الشغل هى الجول والارج والقدم - باوند . العلاقة بين هذه الوحدات هي $1 J = 10^7 \text{ erg} = 0.738 \text{ ft. lb}$.

تقيس القدرة معدل بذل الشغل ، وتعرف بالشغل المبذول في وحدة الزمن . الوحدات النموذجية للقدرة هي الواط (وهو الجول في الثانية) والقدم - باوند في الثانية والقدرة الحصانية . العلاقة بين هذه الوحدات هي كالتالى : $746 W = 1 \text{ hp}$ ، $1.36 W = 1 \text{ ft. lb/s}$. وإذا كان للجسم طاقة فإنه يكون قادرا على بذل الشغل . طاقة الحركة (KE) هي القدرة على بذل الشغل بسبب حركة الجسم اذا كانت m هي كتلة الجسم و v سرعته فان $KE = \frac{1}{2}mv^2$. يمكن للجسم أن يفقد هذا الشغل الكبير ضد القوى الخارجية عندما يصل الى حالة السكون . وحدات KE هي نفس وحدات الشغل . إذا تعرض الجسم لقوة محصلة تبذل شغلا عليه فان الشغل المبذول على الجسم يساوى التغير في طاقة حركته .

يقال أن للجسم طاقة وضع ثقالية (PE) إذا كان هذا الجسم قادرا على بذل الشغل بسبب قوة الجاذبية المؤثرة عليه إلى أسفل . طاقة وضع الجسم هي mgh . يمكن للجسم أن يبذل هذا الشغل الكبير عندما يهبط مسافة قدرها h . المستوى المرجعى المستخدم لقياس ارتفاع الجسم اختياري .

إذا كان الشغل المبذول لتحريك الجسم من النقطة A الى النقطة B ضد قوة ما لايعتمد على مسار الحركة . يقال أن هذه القوة احتفاظية . قوة الجذب احتفاظية . ونتيجة لذلك فإن الشغل المبذول ضد الجاذبية لرفع الجسم من A الى B هو mgh ولايعتمد على المسار المتبع . قوى الاحتكاك ليست احتفاظية .

يمكن صياغة نظرية الشغل والحركة لأي جسم كالمى :

$$\text{Loss in KE} + \text{loss in PE} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

ينص قانون بقاء الطاقة على أن الطاقة لا تستحدث ولا تنفى. عندما يحدث نقص فى إحدى صور الطاقة فإن زيادة مساوية لابد أن تحدث فى صور الطاقة الأخرى . ينتج الشغل المبذول ضد قوى الاحتكاك طاقة حرارية تساوى مقداراً شغل الاحتكاك المبذول . هناك صور كثيرة للطاقة . الطاقة الكيميائية والكهربائية والنوية صور نموذجية للطاقة .

المكنات هى أجهزة تساعدنا على بذل الطاقة . لا تبذل المكنات ابداً شغلاً أكبر من الشغل المعطى إليها . تستخدم الفائدتان الميكانيكيتان المثالية والفعلية لوصف المكنة البسيطة . إذا كانت قوة الدخل F تتحرك مسافة قدرها s_1 عندما تتحرك قوة الخرج W مسافة قدرها s_0 ، فإن $IMA = s_1/s_0$ بينما $AMA = W/F$ اصغر دائماً من IMA . تعرف كفاءة المكنة بالعلاقة $\text{الكفاءة} = (\text{شغل الخرج}) / (\text{شغل الدخل})$. وهذه الكمية تكافئ $\text{eff} = AMA/IMA$.

الحد الأدنى من الاهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادراً على عمل الآتى :

- ١ - تعريف الشغل ووحداته . اعطاء أمثلة مختلفة لقوة لا تبذل شغلاً لأن (أ) $s = 0$ أو (ب) $F_s = 0$ اعطاء أمثلة لقوة تبذل شغلاً سالبا .
- ٢ - حساب الشغل المبذول على جسم ما بواسطة قوة معينة ثابتة عندما يتحرك الجسم مسافة معينة فى خط مستقيم .
- ٣ - تعريف القدرة ووحداتها . حساب القدرة من معطيات المعدل الذى يبذل به الشغل .
- ٤ - تحويل وحدات الواط والقدم - باوند فى الثانية والقدرة الحصانية كل منها إلى الأخرى .
- ٥ - تعريف KE وحساب قيمتها بمعلومية m ، v .
- ٦ - حساب التغير فى KE لجسم يقع تحت تأثير قوة محصلة تؤثر فى اتجاه مسافة معلومة .
- ٧ - تعريف طاقة الوضع الثقالية . حساب قيمتها لجسم بمعلومية البيانات اللازمة .
- ٨ - شرح ماذا يعنى بالقوة الإحتفاظية . توضيح حقيقة أن قوة الجذب إحتفاظية .
- ٩ - اعطاء بعض الأمثلة لمواقف تتحول فيها KE إلى PE وبالعكس .
- ١٠ - صياغة نظرية الشغل والطاقة بالكلمات وفى صورة معادلة . تطبيق هذه النظرية على أمثلة مشابهة لتلك الأمثلة المعطاه فى الجزء ٥ - ٦ .

- ١١ - صياغة قانون بقاء الطاقة بأسلوبك الخاص . شرح لماذا لا يتعارض فقد KE فى بذل شغل الاحتكاك مع هذا القانون .
- ١٢ - حساب IMA و AMA والكفاءة لمكنة الصندوق الأسود بمعلومية المعطيات الكافية .
- ١٣ - اعطاء قيمة AMA لمكنة بسيطة مثل جهاز البكرات بشرط معرفة تركيب المكنة .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تكون قادراً على تعريف أو شرح كل من الآتى :

طاقة الوضع الثقالية mgh	الشغل $= F_s s = F s \cos \theta$
القوى الإحتفاظية	الرجل والارج والقدم - باوند
نظرية الشغل والطاقة	القدرة = الشغل / الزمن
قانون بقاء الطاقة	الواط والقدرة الحصانية
$IMA = s_1/s_0$	الكيلو واط ساعة
$AMA = W/F$	$KE = \frac{1}{2}mv^2$

الكفاءة = (شغل الخرج) / (شغل الدخل)
 أو : $\text{Efficiency} = AMA / IMA$

اسئلة وتخمينات

- ١ - يدور القمر وكثير من الاقمار الصناعية حول الأرض في مدارات دائرية تقريبا مركزها هو مركز الأرض . ماهو الشغل الذى تبذله قوة الجاذبية الأرضية عليها ؟
- ٢ - وضع بناء على وجهة نظر طاقة الحركة لماذا يحتمل أن تكون الشاحنة المحملة أكثر تدميرا من فولكس واجن عن الاصطدام بجسم كبير ساكن ؟ افترض أن سرعتين الابتدائيتين متساويتان .
- ٣ - كرة معلقة في نهاية خيط وتتأرجح المجموعة كبندول بسيط . صف ما يحدث لطاقة الحركة عندما يتأرجح البندول ذهابا وإيابا . كرر العمل بالنسبة لطاقة الوضع . ماهى العلاقة بينهما ؟ ماذا يحدث للمجموعة عندما يفقد البندول طاقته ؟ هل يبذل جاذب الخيط للكرة شغلا ؟
- ٤ - يحمل شخص حقيبة بها مشتريات من محل بقالة ويقف ساكنا يتحدث مع صديق . وتقف سيارة ساكنة وموتورها دائر . كيف يتشابه هذان الموقفان من وجهة الشغل والطاقة ؟
- ٥ - يسافر عامل متجول حتى الضمير في شاحنة صندوقية من شيكاغو الى بربرى ، وطوال الطريق ، كان هذا العامل يدفع الحائط الامامى للسيارة . ونظرا لأنه كان في يوم ما طالب فيزياء ، كان هذا العامل يظن أنه يبذل شغلا كبيرا لأن كلا من P و s كانتا كبيرتين . أين الخطأ في هذا التفكير ؟
- ٦ - حيث أن الأرض تتحرك بالنسبة الى الشمس فانه لأى شئ عليها طاقة حركة ، على الأقل في رأى مشاهد يظن أن الشمس ساكنة لماذا لم نكن في حاجة إلى أن نأخذ هذا في الاعتبار عند حل الامثلة في هذا الفصل ؟
- ٧ - هل KE كمية موجهة أم كمية قياسية ؟
- ٨ - كرة كتلتها m موجودة على ارتفاع h_1 فوق سطح المنضدة وكان سطح المنضدة مرتفعا مسافة قدرها h_2 من الأرض . يقول شخص أن طاقة وضع الكرة هي mgh_1 ولكن الآخر يقول أن طاقة وضعها $mg(h_1 + h_2)$. أيهما صحيح ؟
- ٩ - عندما يدخل صاروخ الغلاف الجوى عند عودته من الفضاء فإن مخروط المقدمة يصبح ساخنا جدا . من أين تأتى هذه الطاقة الحرارية ؟
- ١٠ - عندما تسقط قطعة طباشير من على المنضدة فإن سرعتها قبل الاصطدام بالأرضية مباشرة يمكن ايجادها بمساواة طاقة الوضع الابتدائية بالطاقة الكلية قبل أن تصطدم بالأرضية مباشرة. اثبت أن نفس النتيجة سوف يحصل عليها اذا كان المستوى الصفري لطاقة الوضع هو (أ) الأرضية ، (ب) سطح المنضدة ، (ج) السقف .
- ١١ - تحتوى السيارات والجرارات .. الخ على مجموعات تروس يمكن تغييرها بالنقل . ناقش لماذا تستخدم عملية النقل باعتبار أن مجموعات التروس مكثبات مثالية .
- ١٢ - يقترح أن المد والجذر المتدفقان داخلا وخارجا في الموانئ يمكن استخدامهما كمصادر للطاقة . وهناك اقتراح آخر بإمكانية استخدام موجات المحيطات لهذا الغرض . ناقش الآراء المؤيدة والمعارضة لكل من الاقتراحين من وجهة النظر العملية . من أين تأتى الطاقة في كل حالة ؟
- ١٣ - ماهى القدرة الحصانية بالتقريب التى يمكن للإنسان بذلها في فترة قصيرة ، عند صعوده السلالم بسرعة كبيرة مثلا ؟ (ق)
- ١٤ - قدر كمية الشغل النافع (كما تعرف في الفيزياء) التى يمكن للانسان المتوسط بذلها في يوم واحد . وللمقارنة ، يمكن للوجة النموذجية أن تزود الشخص بكمية قدرها $(8.4 \times 10^8 \text{ J}) \approx 2000 \text{ kcal}$ من الطاقة لكل يوم. أين تذهب الكمية الباقية من الطاقة ؟ (ق)
- ١٥ - قدر القوة التى يتعرض لها سائق عندما تصطدم سيارته بأخرى تصادما مباشرا . افترض أن السيارتين متماثلتين وأنها تسيران بسرعة قدرها 60 mi/h . ناقش تأثير أحزمة التثبيت ووضع السائق والعوامل المشابهة الأخرى . (ق)

مسائل :

يمكن حل كثير من المسائل في هذه المجموعة بسهولة كبيرة باستخدام طرق الطاقة .

- ١ - يراد استخدام خيط افقى لجذب جسم كتلته 30 kg على الأرضية بسرعة ثابتة . فاذا كان معامل احتكاك الانزلاق بين الارضية والجسم هو 0.60، فما قيمة الشغل المبذول بواسطة الخيط لجذب الجسم مسافة قدرها 5.0 m ؟
- ٢ - لجذب طفل معين فى عربة تلزم قوة قدرها 30 lb مائلة بزاوية قدرها 20° فوق الممشى الجانبى الأفقى . ماهو الشغل المبذول فى جذب العربة مسافة قدرها 50 ft ؟
- ٣ - تجذب عربة صغيرة مملوءة بالفحم كتلتها 6000 lb الى أعلى على مستوى مائل فى داخل منجم فحم . وكان جبل الجذب موازيا للمستوى المائل ويؤثر بقوة قدرها 200 lb على العربة . ماهو الشغل المبذول على العربة بواسطة الجبل عندما تتحرك العربة مسافة قدرها 100 ft ؟
- ٤ - يتسلق رياضى كتلته 80 kg تلام ارتفاعه 100 m . ماهو الشغل الذى يبذله المتسلق ضد الجاذبية ؟ هل تعتمد كمية الشغل هذه على المسار الذى يتبعه المتسلق ؟ واذا كان زمن التسلق 90 min فما متوسط القدرة الحصانية المستهلكة بواسطة المتسلق بهذه الطريقة ؟
- ٥ - تستغرق شاحنة كتلتها 30,000 kg زمنا قدره 40 min لتصعد فى طريق جبلى من ارتفاع 1800 m الى ارتفاع 2900 m . (أ) ماهو الشغل الذى تبذله الشاحنة ضد الجاذبية ؟ (ب) ماهو متوسط القدرة الحصانية التى تستهلكها الشاحنة ضد الجاذبية فى هذه العملية ؟
- ٦ - اسقط جسم كتلته 2 kg من ارتفاع قدره 12 m وكانت سرعته قبل الاصطدام بالأرض مباشرة هى 7 m/s . ماهو متوسط قوة الاحتكاك التى تعاكس حركتها ؟
- ٧ - ماهى القوة الثابتة اللازمة لتسارع سيارة وزنها 3200 lb من السكون الى سرعة قدرها 60 ft/s فى مسافة قدرها 80 ft ؟
- ٨ - كانت سيارة كتلتها 2000 kg تتحرك بسرعة قدرها 20 m/s عندما اصطدمت بحائط اسمنتى فتوقفت فى خلال مسافة قدرها 3 m . ماهو متوسط القوة المعوقة ؟
- ٩ - يراد ان يرفع موتور مصعدا وزنه 2000 lb من السكون بحيث تصل سرعته الى 8 ft/s على ارتفاع قدره 40 ft . (أ) ماهو الشغل الذى يجب أن يبذله الموتور ؟ (ب) ماهو كسر الشغل الكلى الذى تحول الى طاقة حركة ؟
- ١٠ - تجذب قاطرة سلسلة من الشاحنات الصندوقية إلى أعلى على مستوى مائل بزاوية قدرها 5° بادئة من السكون ، وبعد أن تحرك القطار مسافة قدرها 6000 ft كانت سرعته 30 ft/s . افترض ان الوزن الكلى للقطار 1.50 × 10⁶ lb ماهو الشغل الذى يجب أن تبذله القاطرة ؟ ماهو كسر هذا الشغل الذى يبذل ضد الجاذبية ؟ ويفرض أن التسارع منتظم ، ماهو الزمن الذى تأخذه هذه العملية ؟ ماهى القدرة الحصانية التى تستهلكها القاطرة ؟
- ١١ - يراد استخدام موتور لتشغيل مضخة معمل صغيرة ترفع 500 cm³ من الماء مسافة قدرها 2 m فى كل دقيقة : أوجد الحد الأدنى لواطية الموتور الذى يستطيع ذلك (كتلة 1 cm³ من الماء قريبة جدا من 1 g) . تلميح : ماهو الشغل الذى يجب أن يبذله الموتور فى كل ثانية ؟
- ١٢ - لنفرض أن 10¹⁶ الكترونا تصطدم بستار أنبوبة التليفزيون فى كل ثانية . واذا كان الالكتران يتسارع بين فرق جهد كاف لكى تصل سرعته الى 10⁹ cm/s بادئا من السكون ، فماهى القدرة بالواط التى تستهلك للاحتفاظ بهذه الحزمة من الإلكترونات ؟ (m_e = 9.1 × 10⁻³¹ kg.)
- ١٣ - تستطيع مكنة تخطيط ذرية تعرف بمولد فان د جراف (سيناقش فى الفصول التالية) أن تعجل حزمة من البروتونات (m_{proton} = 1.67 × 10⁻²⁷ kg) من السكون الى سرعة قدرها 10¹⁹ cm/s - فإذا كانت المكنة تعجل 10¹⁶ بروتونا فى الثانية، فماهى القدرة التى تنتجها بالواط . (البروتون هو ذرة ايدروجين قد فقدت الكترونها) .

١٤ - حررت فرامل سيارة وزنها 3200 lb من غير قصد عندما كانت السيارة واقفة على تل . بأى سرعة تتحرك السيارة عندما تصل الى نقطة تقع على بعد 30 ft أسفل نقطة البداية، بفرض أن متوسط قوة الاحتكاك التي تعوق الحركة هي 200 lb . افترض أن المسافة التي قطعها السيارة هي 90 ft .

١٥ - أوقف موتور سيارة كتلتها 2000 kg عندما كانت تتحرك صاعدة على تل بسرعة قدرها 20 m/s . (أ) إذا كانت السيارة تبعد عن قمة التل بمسافة رأسية قدرها 8 m في هذه اللحظة ، هل تستطيع السيارة أن تصل إلى القمة ؟ على أى مسافة رأسية من قمة التل يمكن أن توجد السيارة بحيث تستطيع أن تصل إلى القمة ؟ امل الاحتكاك .

١٦ - تسير رصاصة كتلتها 1.8 g بسرعة قدرها 360 m/s ثم تصطدم بكتلة من الخشب لتصل الى السكون على عمق قدره 6 cm . (أ) ماهى قيمة متوسط قوة التقاصر ؟ (ب) ماهو الزمن الذى تستغرقه الرصاصة لكي تصل الى حالة السكون ؟

١٧ - تنزلق خرزة على سلك كما هو مبين في شكل م ٥ - ١ . ماهى سرعة الخرزة عند B و C و D اذا بدأت الخرزة الحركة من السكون عند A وكانت قوى الاحتكاك مهملة ؟

١٨ - في الشكل م ٥ - ١ المسافة بين A و D على السلك تساوى 400 cm، فاذا بدأت الخرزة من السكون عند A ثم توقفت نهائيا عن الحركة عند الوصول الى D مباشرة ، فما هو متوسط قوة الاحتكاك الذى تعوق حركتها ؟

١٩* - جذب جسم وزنه W بسرعة قدرها v الى أعلى على مستوى لاحتكاكى مائل زاوية ميله θ . إثبت أن الشغل المبذول على الجسم في الزمن t يعطى بالعلاقة :

$$\text{Work} = Wut \sin \theta$$

٢٠* - تقف سيارة كتلتها m على تل ارتفاعه h وطوله L، إثبت أن سرعة السيارة عندما تصل الى قاع التل هي :

$$v = \sqrt{2gh - \frac{2LF}{m}}$$

حيث f متوسط قوة الاحتكاك التي تعوق الحركة .

٢١ - علقت كتلة قدرها M كئيل لبندول في نهاية خيط طوله 4.0 m . جذب الخيط جانبا بواسطة قوة مؤثرة على الكتلة ، حتى صنع الخيط زاوية قدرها 70° مع الرأسى ثم تركت المجموعة حرة . بأى سرعة تتحرك الكتلة عندما تمر تحت نقطة التعليق مباشرة ؟ (إهمل احتكاك الهواء) .

٢٢*** - اذا قطعت الكرة الموصوفة في المسألة ٢١ الخيط عندما مرت تحت نقطة التعليق مباشرة ، أين ستصطدم بالأرضية التي تقع على بعد قدره 2.45 cm تحتها ؟ إعط اجابتك بدلالة المسافة بين نقطة التصادم والنقطة التي تقع على الأرض ، تحت نقطة التعليق مباشرة .

٢٣* - بأى سرعة تتحرك كرة البندول الموصوف في المسألة ٢١ عندما يصنع الخيط زاوية قدرها 20° مع الرأسى ؟

٢٤*** - يجرى رجل التجربة الآتية . وجد هذا الرجل أن سيارته وكتلتها 3200 lb تتسارع على أرض مستوية من السكون إلى 40 ft/s في زمن قدره 10 s وعندما أوقف المحرك وجد الرجل أن السيارة تصل من السرعة 40 ft/s إلى السكون في مسافة قدرها 1600 ft . احسب متوسط القدرة الحصانية التي تنتجها السيارة . (لاحظ أن شغل الاحتكاك المبذول في إيقاف السيارة لايساوى شغل الاحتكاك في البداية . لماذا ؟ افترض بدلا من ذلك أن متوسط قوة الاحتكاك واحد في الحالتين) .

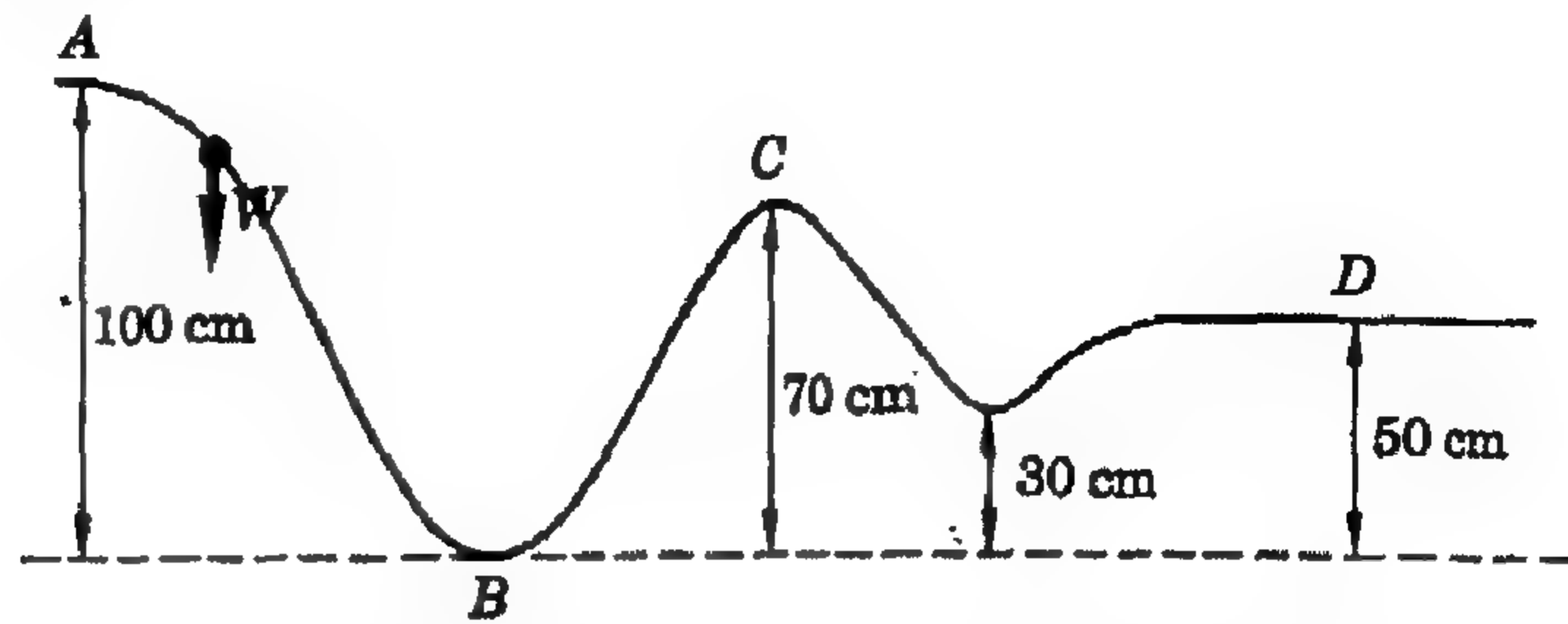
٢٥ - يرفع جسم وزنه 600 lb بواسطة جهاز بكرات باستخدام قوة قدرها 40 lb ، ووجد أن المكنة المناسب لهذا الغرض ترفع الحمل مسافة قدرها 1/2 ft عندما تتحرك القوة المسلطة مسافة قدرها 10 ft . اوجد (أ) IMA (ب) AMA ، (ج) كفاءة المكنة .

٢٦ - صمم أبسط جهاز بكرات تقدر كفاءته بالكمية 75% يمكنه أن يرفع 200 N باستخدام قوة قدرها 40 N .

٢٧ - سلطت قوة قدرها 60 N على جهاز العجلة ومحور العجلة لرفع حمل وزنه 500 N . إذا كان نصف قطر العجلة 1.0 ft ونصف قطر محور العجلة 1.0 in ، اوجد (أ) AMA ، (ب) IMA ، (ج) كفاءة الجهاز اذا كان نصف قطر الحبل الملفوف على محور العجلة هو 0.40 in .

٢٨ - في نوع معين من روافع السيارات يحرك العامل يده ، أى قوة الدخول مسافة قدرها 2.0 ft لكل $\frac{1}{2}$ in يرتفعها الحمل . (أ) ماقيمة IMA لهذه الرافعة ؟ (ب) ماهى قيمة القوة اللازمة لرفع 2000 lb بفرض أن كفاءة الرافعة 20% ؟

شكل (م ٥ - ١)



٢٩ - موتور ملصوق عليه بطاقة مكتوب عليها « موتور قدرته 0.55 kw » ماهى القدرة الحصانية التى ينتجها هذا الموتور بفرض ان كفاءته 80% فقط .

*٣٠ - ثبت بكرة قطرها 8.0 cm على عمود موتور قدرته $\frac{1}{4}$ hp . ما هو الحمل الذى يستطيع سير يجرى على البكرة ان يجذبه اذا كان العمود يدور بمعدل 1800 rev/min (أى دورة فى الدقيقة) ؟ افترض أن كفاءة الموتور 80% وأن قدرة دخل الموتور هى $\frac{1}{4}$ hp .

*٣١ - يدور عمود موتور قدرته 50 w بمعدل قدره 1800 rev/min . وباستخدام تروس تخفيض السرعة يدور العمود النهائى ، أى عمود الخرج ، بمعدل قدره 18 rev/min . (أ) اذا كانت كفاءة المكنة 30% ، فبأى قوة يمكنها أن تجذب سيرا على بكرة نصف قطرها 3.0 cm مثبتة فى عمود الخرج ؟ (ب) اذا عكست مجموعة التروس فى الموتور بحيث يدور عمود الخرج بمعدل 180,000 rev/min ، فما هى القوة المتاحة لجذب السير على نفس البكرة ؟ افترض ان قدرة الدخول للموتور هى 50 w .

الفصل السادس

كمية التحرك وضغط الغازات

قانون بقاء الطاقة الذى عالجناه فى الفصل السابق ليس قانون البقاء الوحيد المعروف فى الفيزياء . ويعتبر قانون بقاء كمية التحرك الذى سنقدمه فى هذا الفصل المثال الثانى لهذه القوانين . وتترتب على هذا القانون نتائج بعيدة المدى ، وسوف نستخدمه فى اشتقاق علاقة لضغط الغاز المثالى . وستكون علاقة ضغط الغاز وقانون بقاء كمية التحرك فى غاية الأهمية لنا فى الفصول التالية .

٦ - ١ مفهوم كمية التحرك

من الخبرات العامة المعروفة لنا جميعا أن للجسم المتحرك كمية تحرك تجعل الجسم يؤثر بقوة معينة على أى شخص يحاول إيقافه . وكلما كان الجسم يتحرك بسرعة أكبر كلما كان من الصعب إيقافه . بالإضافة إلى ذلك ، كلما كانت كتلة الجسم أكبر كلما كانت صعوبة إيقافه أكبر . فمثلا ، من الصعب إيقاف سيارة تتحرك بمعدل قدره 2 m/s عن إيقاف لعبة على هيئة سيارة صغيرة تسير بنفس السرعة .

وقد سمي نيوتن هذه الصفة للجسم المتحرك بحركة الجسم . وفي الوقت الحاضر تعرف هذه الكمية باسم كمية تحرك الجسم وتعرف بالعلاقة :

$$\text{Momentum} = mv = p \quad \text{كمية التحرك} \quad (٦ - ١)$$

في هذه العلاقة v هي السرعة للكتلة m . كمية التحرك إذن هي كمية موجهة أو متجهة في نفس اتجاه الحركة ، أى في اتجاه السرعة . من المعتاد استعمال الرمز p لتمثيل كمية التحرك .

من الواضح أن كمية تحرك الجسم هي نتيجة للقوى التى تسبب تسارع الجسم من السكون إلى السرعة v . بالمثل ، فإذا أريد إبطاء الجسم ، أى جعله يفقد كمية التحرك ، فمن الضروري أن نسلط عليه قوة معوقة . كذلك فإن القوة المعوقة الكبيرة تسبب فقداناً أكبر لكمية تحرك الجسم في فترة زمنية معينة من الذى تسببه قوة معوقة صغيرة في نفس الزمن . يراد الآن إيجاد العلاقة الرياضية المضبوطة بين القوة والتغير في كمية التحرك .

٦ - ٢ قانون نيوتن الثاني مصاغاً مرة أخرى

اعتبر تسارع جسم بواسطة قوة ثابتة كما هو مبين بالشكل ٦ - ١ . القوة المذكورة هي صافي القوة غير المتزنة المؤثرة على الجسم والتي تسبب تسارعا منتظما لهذا الجسم في الاتجاه x . يمكن كتابة قانون نيوتن الثاني كما يلي :

$$a = \frac{F}{m}$$

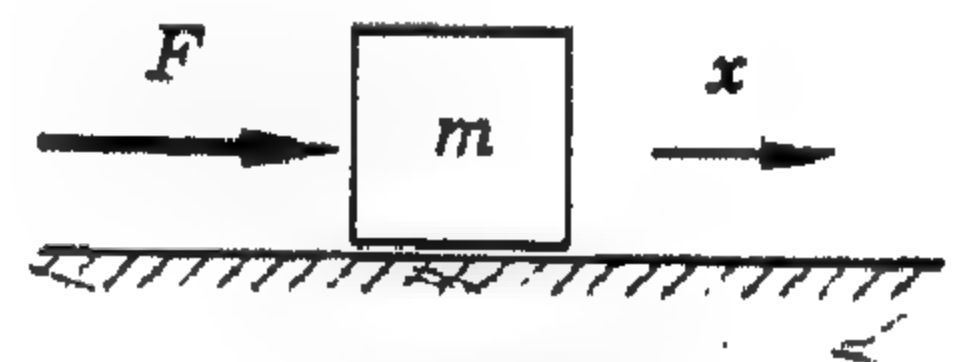
وإذا كانت السرعة الابتدائية للجسم هي v_0 وكانت القوة تؤثر عليه لزمن قدره t فإن معادلات الحركة سوف تعطى النتيجة الآتية :

$$v = v_0 + at$$

وباستبدال a بالكمية F/m وإعادة ترتيب حدود المعادلة سنحصل على :

$$Ft = mv - mv_0 \quad (٦ - ٢)$$

نرى من هذه المعادلة أن التغير في كمية حركة الجسم $mv - mv_0$ يساوى حاصل ضرب القوة المؤثرة في زمن تأثيرها . وهذا بالفعل أقرب إلى الطريقة التى كتب بها



شكل ٦ - ١

القوة الكلية المطبقة F تزيد كمية تحرك الكتلة . كمية التحرك لها اتجاه ، والزيادة ستكون في اتجاه F .

نيوتن قانونه الثاني من الصورة $F = ma$ التي أعطيناها سابقا . والصورة الأولى أكثر عمومية من الصورة $F = ma$ لأن من السهل تعميمها بحيث تأخذ في الاعتبار التغيرات في كتلة الجسم أثناء تسارعه . فمثلا ، عندما يتسارع الصاروخ فإنه يفقد من كتلته نظرا لاستنفاد الوقود واندفاعه الى الخارج لإمداد الصاروخ بالدفع اللازم لحركته . وسوف نرى كذلك في الفصل الثامن والعشرين أن كتلة الجسم تزداد عند السرعات العالية . وعند تغير الكتلة مع السرعة فإن المعادلة (٦ - ٢) يمكن أن نكتب على الصورة :

$$Ft = mv - m_0v_0 = \Delta p \quad (٦ - ٣)$$

حيث Δp هو التغير في كمية التحرك ، لاحظ أن اتجاه التغير في كمية التحرك هو نفس اتجاه القوة . وحدات كمية التحرك هي حاصل ضرب وحدة القوة في وحدة الزمن ، أو وحدة الكتلة في وحدة السرعة ، وهو نفس الشيء . ومن أمثلة هذه الوحدات النيوتن - ثانية أو الكيلوجرام - متر في الثانية . في كثير من الأحيان يكون من الضروري تطبيق مفهوم كمية التحرك السابق ذكره على الحالات التي تكون فيها القوة المؤثرة متغيرة . فمثلا ، عندما يدفع المضرب كرة البيسبول فإن القوة المؤثرة تتغير بالتأكيد من لحظة الى أخرى أثناء التصادم . وفي مثل هذه الحالات لانهم عادة بأي شيء إلا متوسط القوة . بناء على ذلك يعرف متوسط القوة المذكورة في المعادلتين (٦ - ٢) أو (٦ - ٣) بأنها تلك القوة المنتظمة اللازمة لإحداث التغير المشاهد في كمية التحرك . وعموما فإن القوة الناتجة من تطبيق المعادلة (٦ - ٢) أو (٦ - ٣) في عمليات التصادم ستكون متوسط القوة المعروفة حسب المفهوم السابق ذكره .

وحيث أن زمن التصادم وكذلك القوة المؤثرة أثناء التصادم لاتكون عادة معروفة تماما ، فمن المعتاد إدماج حاصل الضرب Ft في كمية واحدة تسمى الدفع . باستخدام هذه المصطلحات الفنية يمكننا القول أن التغير في كمية تحرك جسم ما يساوي الدفع المؤثر عليه .

مثال توضيحي ٦ - ١ : سيارة متحركة كتلتها 1500 kg أنقصت سرعتها من 20 m/s إلى 15 m/s في زمن قدره 3.0 s . ماهو متوسط القوة المعوقة ؟

طريقة الحل : بتطبيق المعادلة (٦ - ١) أو (٦ - ٢) نجد أن :

$$Ft = mv - mv_0$$

$$F(3 \text{ s}) = (1500 \text{ kg})(15 \text{ m/s}) - (1500 \text{ kg})(20 \text{ m/s})$$

ومنه نجد أن $F = -2500 \text{ N}$. وتبين الإشارة السالبة أن القوة معوقة لحركة السيارة .

مثال توضيحي ٦ - ٢ : يتحرك إلكترون بسرعة قدرها $2.6 \times 10^8 \text{ m/s}$ وكتلته $18.0 \times 10^{-31} \text{ kg}$ وهو مايساوى ضعف كتلة السكون للإلكترون وهي $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$. ما هو متوسط القوة F اللازمة لتعجيل الإلكترون الى هذه السرعة من سرعة ابتدائية قدرها $1.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ في زمن قدره $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}$ ؟ كتلة الإلكترون عند هذه السرعة الأقل تساوى $9.5 \times 10^{-31} \text{ kg}$ (سنناقش تغير كتلة الجسيمات المتحركة بسرعة عالية في الفصل السادس والعشرين) .

طريقة الحل : بتطبيق المعادلة (٦ - ٣) نجد أن :

$$Ft = mv - m_0v_0$$

$$F(10^{-7} \text{ s}) = (18 \times 10^{-31} \text{ kg})(2.6 \times 10^8 \text{ m/s}) - (9.5 \times 10^{-31} \text{ kg})(1 \times 10^8 \text{ m/s})$$

أو :

$$F \approx 47 \times 10^{-16} - 9.5 \times 10^{-16} \text{ N} \approx 37 \times 10^{-16} \text{ N}$$

٦ - ٣ بقاء كمية التحرك

تأمل تصادم الجسيمين المبينين في شكل ٦ - ٢ . هذان الجسمان قد يكونان كرتين أو جزءين كرويين أو ماشابه ذلك . ولأغراضنا الخاصة يمكننا أن نعتبر أن الجسيمين كون قائم بذاته أى أنهما معزولان عن جميع الأجسام الأخرى . وطبقا لقانون نيوتن الثالث ، اذا وجدت قوة مؤثرة على أحد الجسيمات فلا بد أن توجد قوة رد فعل مساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه مؤثرة على جسم آخر في الكون . وفي هذه الحالة الخاصة لابد أن تؤثر قوة رد الفعل على الجسم الآخر وتؤدي هذه الحقيقة الى قانون بقاء هام وقيم للغاية .

لنحسب التغير في كمية تحرك الجسم الأيسر في شكل ٦ - ٢ للتصادم . يمكننا استخدام المعادلة (٦ - ٢) أو (٦ - ٣) لإيجاد متوسط القوة :

$$Ft = mv - mv_0$$

بالمثل ، في حالة الجسم الأيمن :

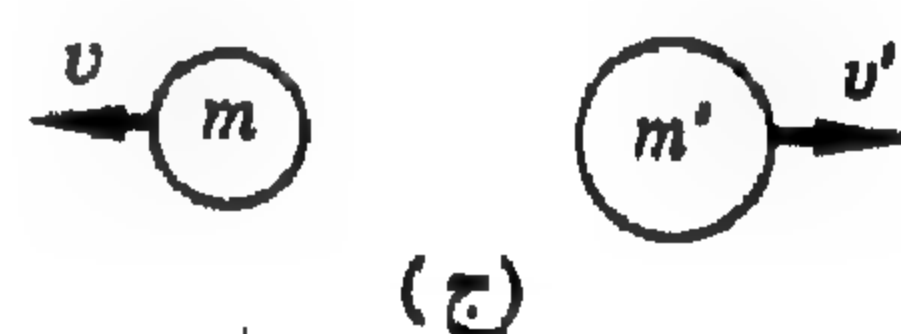
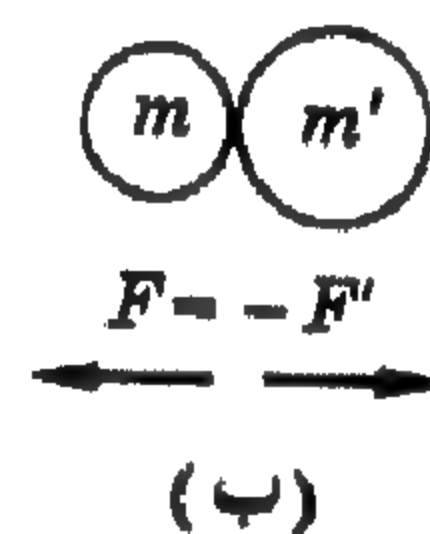
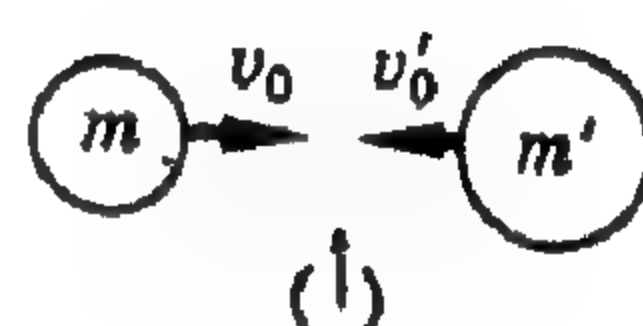
$$F't = m'v' - m'v'_0$$

وبجمع هاتين المعادلتين نحصل على :

$$(F + F')t = (mv - mv_0) + (m'v' - m'v'_0)$$

وحيث أن القوة المتجهة F هي قوة الفعل مساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه لقوة رد الفعل F' ، فإن $F = -F'$ ، وعليه فإن الطرف الأيسر للمعادلة السابقة يساوى صفرا . إذن :

$$0 = (mv - mv_0) + (m'v' - m'v'_0)$$



شكل (٦ - ٢)

عند تصادم الجسيمين تكون القوة المؤثرة على أحدهما مساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه للقوة المؤثرة على الآخر . كمية التحرك محفوظة أثناء التصادم .

أى أن : مجموع التغير فى كمية تحرك الكرة الأولى والتغير فى كمية تحرك الكرة الثانية يساوى صفرا .

0 = change in momentum of 1st ball

+ change in momentum of 2d ball

وهكذا فان التغير الكلى فى كمية تحرك كون معزول يتكون من جسيمين يساوى صفرا .

من الممكن تعميم هذه الطريقة فى التفكير على الأنظمة الأكثر تعقيدا . لتحقيق وذلك يلزمنا أن نعرف مايسمى بالنظام المعزول . النظام المعزول هو مجموعة من تعريف الأجسام محصلة القوى التى تؤثر عليها من الخارج تساوى صفرا . فمثلا ، الكون ككل هو نظام معزول . فى هذا النظام ، لكل قوة مؤثرة على أحد الأجسام هناك قوة مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه تؤثر على جسم آخر . ونتيجة لذلك فإن التغير فى كمية حركة الأجسام مأخوذة ككل يساوى دائما صفرا .

وتنطبق هذه الاعتبارات على أى نظام معزول ، ويمكن تلخيصها فى قانون بقاء كمية التحرك الخطى الذى ينص على الآتى :

قانون بقاء كمية التحرك الخطى

كمية التحرك الكلية لنظام معزول من الأجسام ثابتة .

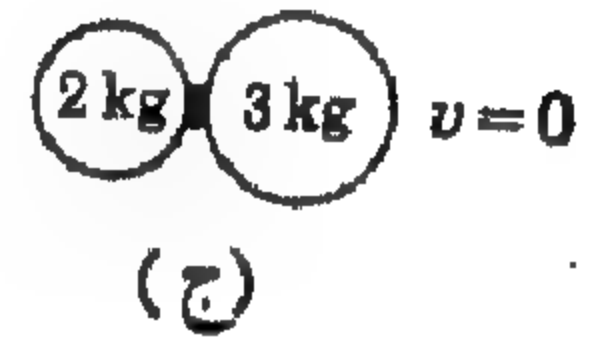
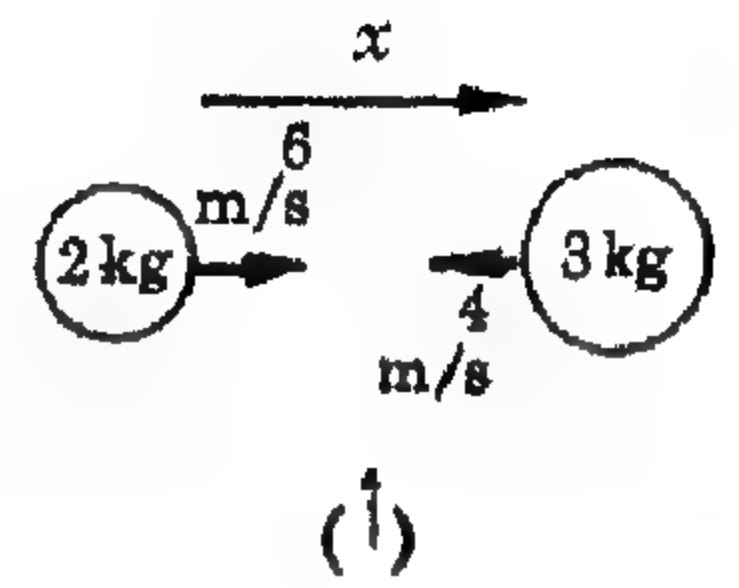
وحتى اذا لم تكن الأجسام معزولة تماما فان هذا القانون يكون نافعا فى حالات كثيرة . فمثلا عند اصطدام سيارتين يسبب ترحلق العجلات على الطريق المرصوف ظهور قوى خارجية تؤثر على النظام المكون من السيارتين . وحتى فى هذه الحالة تكون القوى التى تؤثر بها احدى السيارتين على الأخرى فى لحظة التصادم عادة كبيرة جدا ، أكبر كثيرا من قوى الترحلق المؤثرة على الطريق . وهكذا فإن التغيرات الكبيرة فى كمية التحرك التى تحدث فى لحظة التصادم تنتج جميعها تقريبا كنتيجة للقوة التى تؤثر بها احدى السيارتين على الأخرى . نتيجة لذلك ، لازال من الممكن تطبيق قانون بقاء كمية التحرك على النظام المكون من السيارتين فى لحظة التصادم بالرغم من ان النظام ليس معزولا .

عند تطبيق قانون بقاء كمية التحرك يجب أن نلاحظ أن كمية تحرك الجسم كمية متجهة . لتوضيح أهمية ذلك لنرجع الى الشكل ٦ - ٣ . بأخذ الاتجاه x كاتجاه موجب ، يمكن كتابة كمية التحرك الكلية قبل التصادم (شكل ٦ - ٣ أ) على الصورة :

$$\begin{aligned} \text{كمية التحرك قبل التصادم} &= mv_0 + m'u'_0 \\ &= (2 \text{ kg})(6 \text{ m/s}) + (3 \text{ kg})(-4 \text{ m/s}) \\ &= 12 - 12 = 0 \end{aligned}$$

لاحظ أنه بالرغم من أن كلا من الجسمين كانت له كمية تحرك قبل التصادم ، فإن كمية تحرك النظام ككل تساوى صفرا . وهذه بالطبع حالة خاصة بسيطة اختيرت لتوضيح هذه الحقيقة المثيرة أن كمية التحرك متجهة . ومع ذلك فإن هذه الحالة الخاصة التي يكون فيها كمية التحرك الكلية مساوية للصفر هامة في كثير من الوجوه .

ماذا يحدث بعد التصادم ؟ يخبرنا قانون بقاء كمية التحرك أن كمية التحرك لهذا النظام المعزول لن تتغير نتيجة للتصادم . وعليه ففي هذه الحالة لابد أن تكون كمية التحرك بعد التصادم مساوية للصفر . لإثبات ذلك من الممكن استخدام الطريقة الموضحة في الجزء ب من شكل ٦ - ٣ . لاحظ أن مقدار كمية تحرك كل من الجسمين هو $9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ولكن كمية التحرك موجبة لأحد الجسمين وسالبة للآخر . وهذا بالتأكيد حل ممكن لهذه المسألة لأن كمية التحرك محفوظة . ومع ذلك فلنا الحق أن نتساءل عما إذا كان هذا هو الحل الوحيد الممكن للمسألة .



شكل (٦ - ٣)

من السهل إثبات أن الحل الموضح في شكل ٦ - ٣ ب ليس هو الحل الوحيد الصحيح في حالة معينة . لنفرض أن أحد الجسمين كان يحمل قطعة من العلك (اللبان) ملتصقة على الجانب الذي يحدث فيه التصادم . وإذا كانت العلك لزجة بدرجة كافية فإن الجسمين سوف يلتصقان سويا بعد التصادم . (إذا لم تعجبك هذه الطريقة لتثبيت الجسمين معا يمكنك استخدام مغناطيسين على الجسمين لتثبيتهما معا . وربما أمكنك أن تفكر في طرق أخرى لتحقيق ذلك ، ماذا يمكن أن يفعله هذان الجسمان بعد أن يلتصقا معا ؟

يُمْكِنُنا قانون بقاء كمية التحرك من الإجابة على هذا السؤال . حيث أن كمية تحرك النظام قبل التصادم تساوى صفرا فإنه يجب أن يساوى صفرا كذلك بعد التصادم . ولكن حيث أن الجسمين قد ألتصقا الآن معا فإنهما يجب أن يتحركا كوحدة واحدة ، وعندئذ ستكون سرعتاهما في نفس الاتجاه . ومن ثم فليست هناك امكانية اطلاقا لأن تتعادل كمية تحرك أحد الجسمين مع الأخرى بعد التصادم . نستنتج من ذلك أن الطريقة الوحيدة التي يمكن أن تجعل كمية التحرك بعد التصادم مساوية للصفر إذا التصق الجسمان هو أن يسكن الجسمان بعد التصادم . في هذه الحالة إذن سوف يتصادم الجسمان ثم يلتصقان ويتوقفان نهائيا عن الحركة .

الحالتان الموضحتان في (ب) و (ج) هما نتيجتان ممكنتان من الناحية الفيزيائية لتصادم الجسمين الموضحين في (أ) . في كلتا الحالتين لابد أن تكون كمية التحرك بعد التصادم مساوية لكمية التحرك قبل التصادم . أي صفرا . وعليه فإن كمية التحرك محفوظة بالرغم من أن K_i ليست كذلك

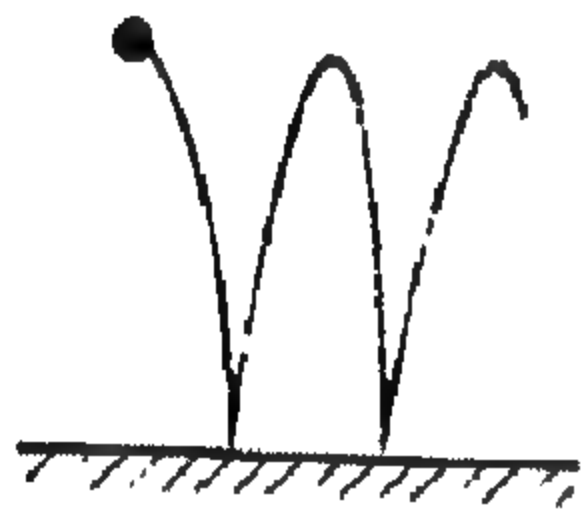
وبالطبع فإن الحالة السابقة بسيطة جدا ، وهي إحدى أبسط الحالات التي يمكن تصورها مع ذلك . وحتى في هذه الحالة لا يمكننا أن نعطي إجابة كاملة ومحددة على السؤال : ماذا يحدث عند تصادم جسمين كميتا تحركهما متساويتان في المقدار ومتضادتان في الاتجاه ؟ وقد يبدو الموقف أكثر خداعا إذا لاحظنا أن طاقة حركة

النظام قبل التصادم تساوى طاقة حركته بعد التصادم فى كل من الحلين المعطيين فى شكل ٦ - ٣ . ويبدو أن KE ليست دائما محفوظة فى عمليات التصادم . وسوف نحتاج الى معرفة كمية KE المفقودة فى التصادم قبل أن نتمكن من إيجاد الاجابة الصحيحة على السؤال السابق ذكره .

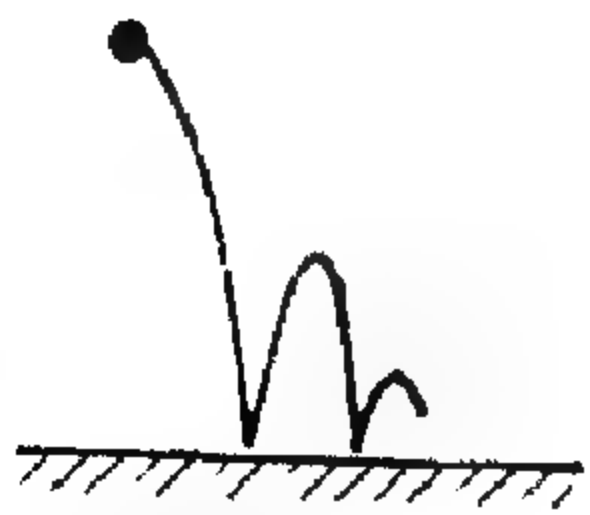
٦ - ٤ التصادم المرن وغير المرن

ماذا حدث لطاقة حركة الجسمين المذكورين فى الجزء السابق عندما تصادما والتصقا معا ؟ من المحتمل أن يكون الجزء الأكبر من الطاقة قد فقد فى بذل الشغل على قطعة العلك الموجودة بين الجسمين مسببة انبعاجها تحت تأثير قوة التصادم . وتظهر هذه الطاقة فى آخر الأمر على صورة طاقة حرارية . بالإضافة إلى ذلك من المحتمل أن ينبعث جزء من الطاقة على هيئة موجات صوتية . وعلى أى حال فإن KE تتحول كلية الى صور أخرى من الطاقة . ويسمى التصادم الذى يحدث فيه ذلك بالتصادم غير المرن تماما .

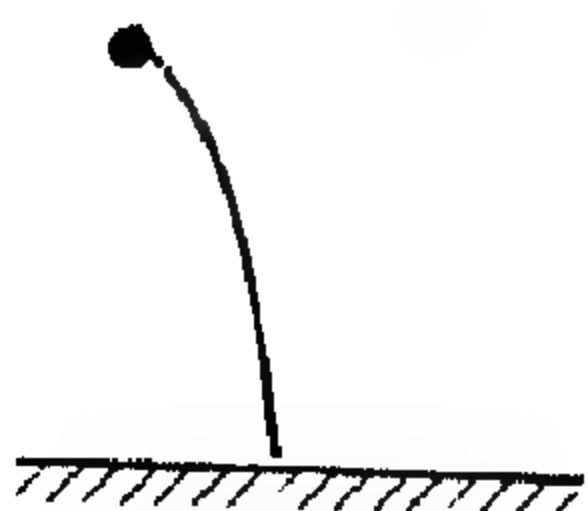
شكل (٦ - ٤)
فى التصادم المرن التام تكون
طاقة الحركة محفوظة . أما اذا
كان التصادم غير مرن تماما
فإن طاقة الحركة تفقد
بأكملها .



مرن تماما (تام المرونة)



غير مرن



غير مرن تماما

واذا كان الجسمان المتصادمان كرتى تنس فان جزءا معينا من KE سوف يفقد ، وعليه فان كلا من الكرتين سوف ترتد مبتعدة عن الأخرى بعد التصادم . وبالرغم من ذلك فان الطاقة المفقودة على صورة احتكاك عندما تتحرك الجزيئات فى الكرة على بعضها عند انبعاج الكرة ، وكذلك الطاقة المفقودة على هيئة صوت وصور أخرى ، ستسبب نقص KE بعد التصادم عنها قبل التصادم . ويعرف التصادم الذى تفقد فيه KE بالتصادم غير المرن .

وفى حالات خاصة معينة لا تفقد أى طاقة تقريبا أثناء التصادم . وفى الحالة المثالية ، عندما لا يحدث أى فقد لطاقة الحركة اطلاقا ، يقال أن التصادم مرن تماما . ومن أمثلة هذا النوع من التصادم كرة صلبة تسقط على جسم صلب ثقيل مثل أرضية من الرخام وارتدادها الى نفس ارتفاع نقطة البداية تقريبا مع فقد كمية مهملة من الطاقة فى التصادم مع الأرضية .

هذه الأنواع الثلاثة من السلوك أثناء التصادم مع جسم ثقيل موضحة فى شكل ٦ - ٤ . وفى الحقيقة فإن النقص فى الارتفاع عند الارتداد هو طريقة معتادة لاختبار رجوعية المواد المختلفة . ومن الواضح أنه إذا أسقطت كرة من ارتفاع قدره h ثم ارتفعت بعد الارتداد الى ارتفاع قدره h_2 فإن النقص فى طاقة وضع الكرة عند هذين الارتفاعين هو الطاقة التى فقدتها الكرة عند التصادم . وحتى بالنسبة لجسم عالى المرونة مثل كرة مصممة من المطاط فان الارتفاع النهائى الذى تصل اليه الكرة بعد الارتداد يمثل فقط حوالى 75% من الارتفاع الابتدائى (تستطيع الكرة السوبر Super ball أن تصل الى ارتفاع اكبر من ذلك) .

تتولد كمية كبيرة من الحرارة في الكرة عند التصادم نتيجة لاحتكاك جزيئاتها كل منها بالأخرى عندما تتشوه الكرة أثناء التصادم . وحيث أن هذه الظاهرة لا تتضمن أى مادة صلبة ، فليس من الغريب أن تفقد كرة معدنية صغيرة عند التصادم كمية من الطاقة أقل من تلك التى تفقدها كرة من المطاط . لذلك فإن الكرة المعدنية ترتد أحسن من الكرة المطاطية .



(أ) قبل التصادم

مثال توضيحي ٦ - ٣ : اصطدمت شاحنة وزنها 6400 lb متحركة بسرعة قدرها 30 ft/s بسيارة وزنها 3200 lb تسير في الاتجاه المعاكس بسرعة قدرها 90 ft/s . فإذا التصقت السيارتان بعد التصادم ، فبأي سرعة وفي أى اتجاه سيتحركان ؟ (انظر شكل ٦ - ٥) .

$$v = v'$$



(ب) بعد التصادم

طريقة الحل : لنعتبر أن الاتجاه x هو الاتجاه الموجب ثم نطبق قانون بقاء كمية التحرك (من الواضح أن KE ليست محفوظة في هذا التصادم) . لنفرض أن v هى السرعة المشتركة للسيارتين بعد التصادم .

كمية التحرك بعد التصادم = كمية التحرك قبل التصادم

$$\begin{aligned} \text{Momentum before} &= \text{momentum after} \\ (m_1 v_{01})_{\text{truck}} + (m_2 v_{02})_{\text{car}} &= (m_1 + m_2)v \\ \left(\frac{64,000}{32}\right)(30) + \left(\frac{3200}{32}\right)(-90) &= \left(\frac{64,000 + 3200}{32}\right)v \end{aligned}$$

ونحل هذه المعادلة بالنسبة الى v سنجد أن $v = 24.3 \text{ ft/s}$. وتبين الإشارة الموجبة أن الحركة النهائية في الاتجاه الموجب من المحور x ، أى في نفس الاتجاه الذى كانت الشاحنة تتحرك فيه .

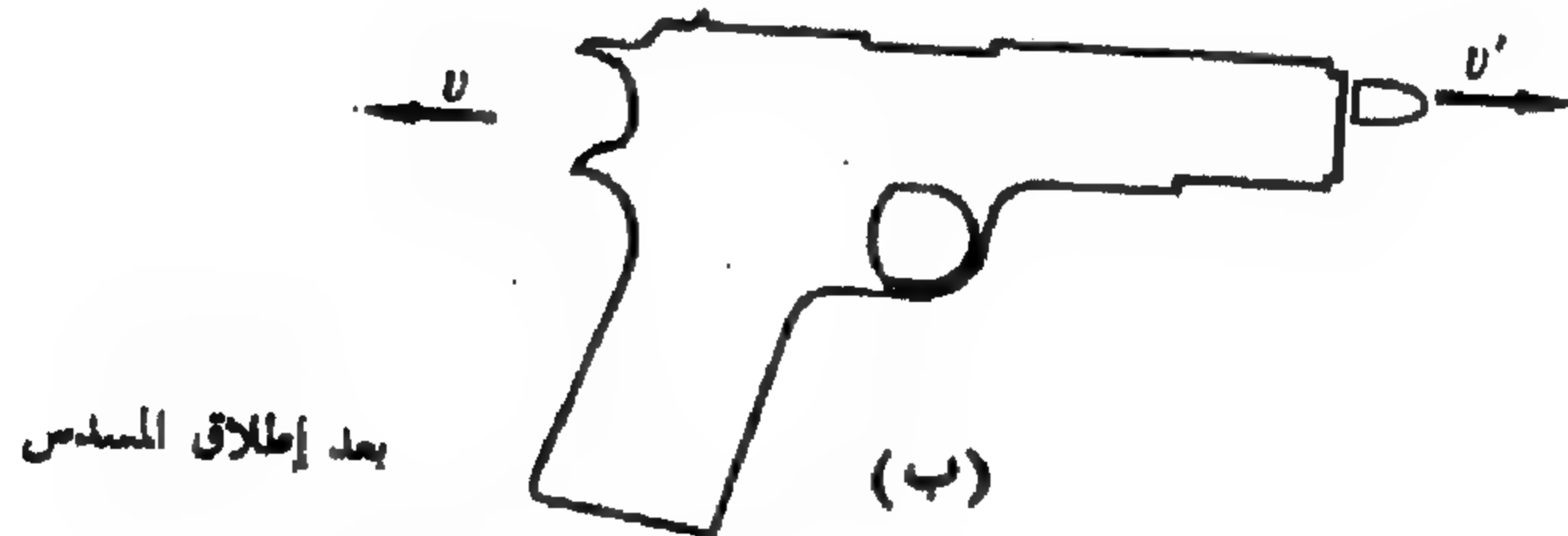
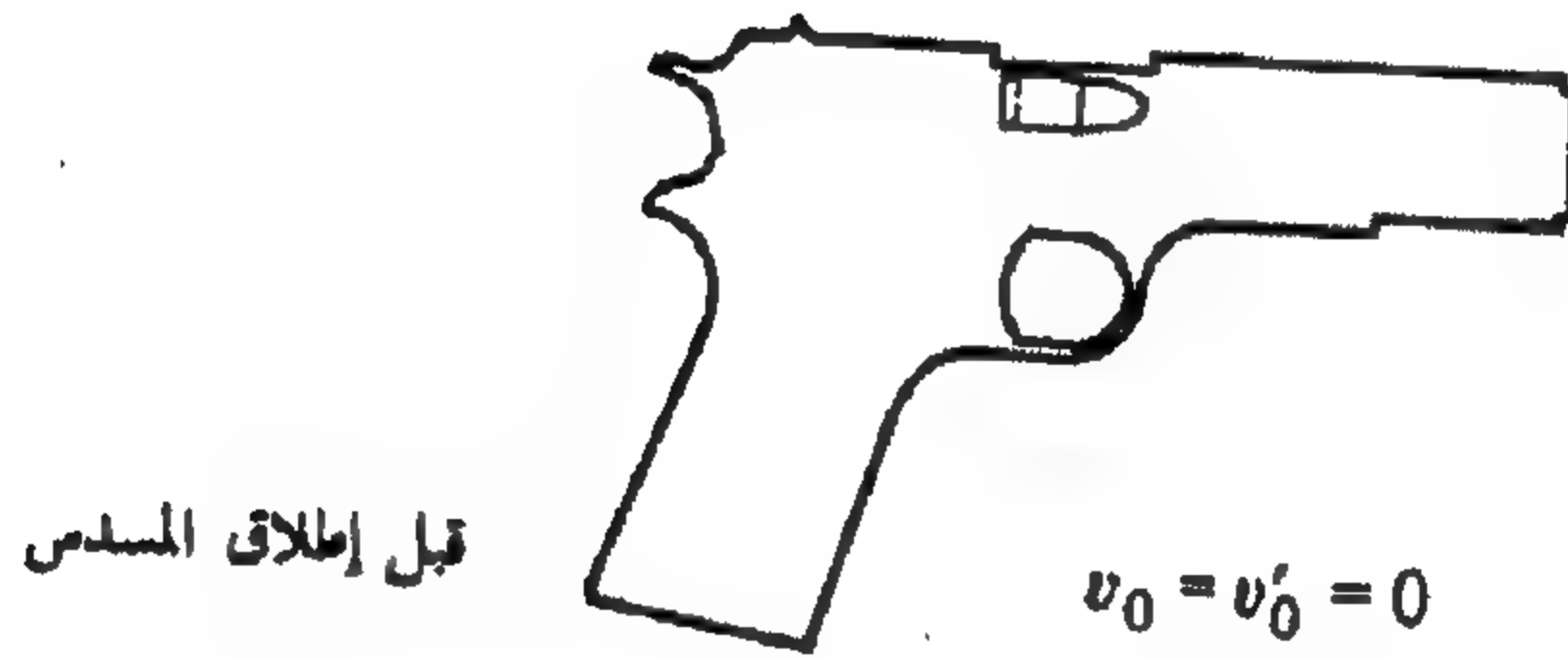
شكل (٦ - ٥)

تصادم الشاحنة والسيارة غير مرن تماما في هذه الحالة . ومع ذلك ، فإن كمية التحرك يجب أن تظل محفوظة .

لاحظ أن سرعة الشاحنة قد نقصت قليلا ، بينما انعكس اتجاه حركة السيارة تماما . من المفيد تقدير متوسط القوة التى تؤثر على سائق السيارة أثناء التصادم ، ولكننا سنترك هذا كتمرين . (إذا أردت حساب هذه القوة لاحظ أن الدفع المؤثر على السائق يساوى التغير في كمية تحركه) . وسوف تحتاج أيضا الى معرفة زمن التصادم ، واحدى الطرق لتحقيق ذلك هو إيجاد الزمن اللازم للسيارة لكى تتحرك مسافة تساوى تقريبا طول سقف السيارة . لماذا ؟)

مثال توضيحي ٦ - ٤ : يمثل الشكل ٦ - ٦ أ صورة بالأشعة السينية لمسدس بعد انطلاق الرصاصة مباشرة . تسبب غازات الاحتراق الناتجة عن انفجار البارود تسارع الجزء المقذوف من الرصاصة في ماسورة المسدس الى الخارج . فإذا كانت M و m هما كتلتا المسدس والمقذوف على الترتيب وكانت سرعة خروج المقذوف هى v' ، اوجد سرعة ارتداد المسدس .

طريقة الحل : اذا نظرت بعناية الى الصورة يمكنك أن ترى اليد التي تحمل المسدس . ولكن القوة الخارجية التي تؤثر بها هذه اليد على نظام المسدس صغيرة بالمقارنة بالقوى الداخلية الناتجة من انفجار البارود . يمكننا إذن أن نفترض أن المسدس معزول عند لحظة الانفجار وأن كمية التحرك محفوظة ، ويوضح هذا الموقف في شكل ٦ - ٦ ب . أى أن :



شكل (٦ - ٦)
قبل إطلاق المسدس كانت
كمية تحركه صفراً . وعليه
فإن مجموع كميتي التحرك
لابد أن يساوى صفراً بعد
إطلاقها . (أ) هيوليت -
باكارد . ، اخذت الصورة
باستخدام جهاز الأشعة
السينية (وميضى) . *

كمية التحرك بعد التصادم مباشرة = كمية التحرك قبل التصادم مباشرة

$$\text{Momentum just before} = \text{momentum just after}$$

$$mv'_0 + Mv_0 = mv' + Mv$$

وحيث أن $v_0 = v'_0 = 0$ فإن المعادلة السابقة تصبح :

$$0 = mv' + Mv$$

إذن ، سرعة ارتداد المسدس هي :

$$v = -\frac{m}{M}v'$$

لاحظ أنه كلما زادت كتلة المسدس كلما قلت سرعة الارتداد .

مثال توضيحي ٦ - ٥ : افترض في المثال السابق أن $m/M = 1/150$ وأن $v' = 200 \text{ m/s}$. افترض أيضا أن المسدس يرتد 2.5 cm عندما توقفها اليد التي تحملها . ماهو متوسط القوة التي يؤثر بها المسدس على اليد ؟ اعتبر أن كتلة المسدس 1.25 kg .

طريقة الحل : تعطى طاقة حركة المسدس بعد انطلاق الرصاصة بالعلاقة

$$\begin{aligned} \text{طاقة حركة المسدس} &= \frac{1}{2}Mv^2 = \frac{1}{2}M\left(\frac{m}{M}\right)^2 v'^2 = 0.889M \text{ joules} \\ &= 1.11 \text{ J} \end{aligned}$$

وتفقد هذه الطاقة في بذل الشغل ضد اليد التي تحمل المسدس . وبفرض أن F هي متوسط القوة المعاكسة التي تؤثر بها اليد وأن مسافة الارتداد هي 0.025 m ، فإن :

طاقة حركة المسدس = الشغل المبذول

$$\text{Work done} = \text{gun's KE}$$

$$(F)(0.025) = 1.11$$

ومنه :

$$F = 44 \text{ N}$$

هل يمكنك أن تذكر بعض العوامل التي تعتمد عليها ركلة البندقية أو بندقية الرش .

مثال توضيحي ٦ - ٦ : تتحرك كرة كتلتها 40 g الى اليمين بسرعة قدرها 30 cm/s ثم تصطدم اصطداما مباشرا بكرة ساكنة كتلتها 80 g . اوجد سرعة كل من الكرتين بعد التصادم بفرض أن التصادم مرن تماما . (نعني بكلمة مباشر أن الحركة تتم في خط مستقيم) .

طريقة الحل : كمية التحرك محفوظة أثناء التصادم . إذن ، باعتبار أن سرعتي الكرتين اللتين كتلتها 40 g و 80 g هما v و v' على الترتيب نجد أن :

كمية التحرك بعد التصادم = كمية التحرك قبل التصادم

$$\text{Momentum before} = \text{momentum after}$$

$$(0.04 \text{ kg})(0.3 \text{ m/s}) + 0 = (0.04 \text{ kg})v + (0.08 \text{ kg})v$$

$$2v' + v = 0.30 \text{ m/s}$$

أو :

لازنا في حاجة الى معادلة أخرى لأن لدينا مجهولين هما v' و v . وحيث أن التصادم مرن. تماما فان KE محفوظة أيضا . اذن :

طاقة الحركة بعد التصادم = طاقة الحركة قبل التصادم

$$\text{KE before} = \text{KE after}$$

$$\frac{1}{2}(0.04 \text{ kg})(0.3 \text{ m/s})^2 + 0 = \frac{1}{2}(0.04 \text{ kg})v^2 + \frac{1}{2}(0.08 \text{ kg})v'^2$$

$$2v'^2 + v^2 = 0.090 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

أو :

يحل المعادلة الأولى بالنسبة الى v والتعويض في هذه المعادلة نحصل على :

$$6v'^2 - (1.2 \text{ m/s})v' = 0$$

النسبية

قدم ألبرت اينشتين نظريته النسبية الخاصة في عام ١٩٠٥ . وسوف تناقش هذه النظرية بالتفصيل في الفصل السادس والعشرين. ولكننا نكتفى في هذه المقالة القصيرة بتلخيص بعض الملاحظات الهامة لهذا التقدم الخطير في فهمنا للطبيعة .

أثبتت تجارب عديدة من أنواع مختلفة الحقائق التالية :

١ - تتحرك نبضة من الضوء في الفراغ دائما بسرعة ثابتة قدرها $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ، ولا تتغير هذه السرعة حتى اذا كان المصدر الضوئي متحركاً .

٢ - اعتبر مختبرين متحركين بسرعتين مختلفتين ولكن ثابتتين . تؤدي التجارب الدقيقة التي تجرى في أى من المختبرين دائما الى نفس القوانين الفيزيائية . ولهذا فمن المستحيل تعيين السرعة المطلقة للمختبر من قياسات تجرى في نفس هذا المختبر فقط .

وقد أثبت اينشتين أن هاتين الحقيقتين تؤديان الى الاستنتاجات التالية . (وقد اختبرت هاتان الحقيقتان بعمل التنبؤات المبنية على أساسهما ، وقد وجد عند اختبار هذه التنبؤات أنها جميعها صحيحة . ونحن نسمى النظرية التي تستخلص منها هذه الاستنتاجات بالنظرية النسبية الخاصة) .

١ - لا يمكن تسارع أى جسم ذى طاقة إلى سرعات أكبر من سرعة الضوء في الفراغ c .

٢ - لنفرض أن جسما يتحرك أمامك بسرعة قدرها v . عندئذ ستبدو لك جميع العمليات التي تحدث في داخل الجسم كما لو كانت أبطأ مما هي في الحقيقة . فمثلا ، إذا كان الجسم الذى يطير مارا في محاذاتك هو ساعة حائط ، ستبدو لك دقاتها بطيئة جدا ، فإذا كانت ساعتك تدق زمنا قدره t_0 فان الساعة المتحركة ستبدو لك كما لو كانت تدق زمنا قدره :

$$t_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

وتسمى هذه الظاهرة استطالة الزمن .

٣ - لنفرض أن جسما يتحرك في اتجاه المحور x بسرعة قدرها v مارا في محاذاتك . في هذه الحالة ستبدو لك أبعاد الجسم في الاتجاه x كما لو كانت أقصر من الحقيقة . عندئذ سوف تقيس الطول L_0 كما لو كان مساويا للمقدار :

$$L_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

ويحدث هذا التناقض في اتجاه الحركة فقط ، ولا يحدث أى تغير في أبعاد الجسم في الاتجاهين y و z .

٤ - لنفرض أن جسما كتلته m_0 موجود في حالة السكون بجانبك . تسمى هذه الكتلة بكتلة السكون . اذا تحرك نفس الجسم بمحاذاةك فستبدو كتلته أكبر من ذلك . وتعطى كتلته في حالة الحركة بالعلاقة :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

لاحظ أنه عندما تكون سرعة الجسم مساوية لسرعة الضوء في الفراغ ، أى $v = c$ ، فان كتلة الجسم ستكون لانهائية في الكبر . لهذا السبب لابد أن تكون القوى اللازمة لتسارع الجسم الى السرعة c لانهائية وهذا يفسر جزئيا النتيجة (المذكورة سابقا) .

٥ - الكتلة والطاقة قابلتان للتبادل . فاذا زادت طاقة الجسم بمقدار ΔE بأية طريقة فإن كتلة الجسم ستزداد بمقدار Δm . كذلك فإن الكتلة تتحطم منتجة الطاقة كما يحدث في المفاعلات النووية . وترتبط الكتلة والطاقة بالعلاقة :

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

وعلى وجه الخصوص ، اذا كان للجسم طاقة حركة KE فان كتلته ستكون m ، حيث :

$$KE = (m - m_0)c^2$$

وبالتعويض عن m من العلاقة $m = m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ واستعمال التقريب $1 \ll v/c$ فاننا سنحصل على العلاقة المعروفة لطاقة الحركة وهى $KE = \frac{1}{2} m_0 v^2$.

يعتبر المعامل النسبى $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ كمية هامة في معظم هذه النتائج . فاذا كان هذا المعامل قريبا جدا من الوحدة فان $m \approx m_0$ ، $KE \approx \frac{1}{2} m_0 v^2$ ، $L \approx L_0$ ، $t \approx t_0$. أما اذا كان $v/c \rightarrow 1$ فان التأثيرات السابق ذكرها ستكون هامة . وكقاعدة تقريبية يمكننا اعتبار السرعة $v = 3 \times 10^7$ m/s كحد فاصل . وتكون التأثيرات النسبية غير هامة في حالة السرعات الأقل من هذه السرعة (عشر سرعة الضوء) . وسوف نناقش هذا الموضوع بتفصيل أكثر في الفصل السادس والعشرين .

وعليه ، هناك اجابتان ممكنتان وهما بالتحديد 0 و 0.20 m/s . بالتعويض عن هاتين المعادلتين في المعادلة الأولى نحصل على 0.3 m/s و 0.10 m/s - لقيمة v .

وتعنى الاجابة الأولى أن الكرة الأولى قد سارت الى اليمين خلال الكرة الثانية . وحيث أن هذا مستحيل فيزيائيا فإننا ننبذ هذه الاجابة . وهكذا فإننا نجد أن الكرة الأولى تسير بعد التصادم الى اليسار بسرعة قدرها 10 cm/s بينما تسير الثانية الى اليمين بسرعة قدرها 20 cm/s .

مثال توضيحي ٦ - ٧ : اطلقت رصاصة كتلتها 10 g بسرعة غير معلومة في قالب من الخشب معلق بجبل في السقف . اخترقت الرصاصة القالب ثم استقرت بداخله . ونتيجة لذلك تأرجح القالب والرصاصة بداخله بعد التصادم الى ارتفاع قدره 30 cm

فوق الموضع الأصلي (أنظر شكل ٦ - ٧ أ ، ب ، ج) . ماهي سرعة انطلاق الرصاصة ؟ (يسمى هذا الجهاز البندول القذفي)

طريقة الحل : KE ليست محفوظة عند التصادم . ومع ذلك ، فبعد التصادم يتحول مجموع طاقتي حركة الرصاصة والقالب الى طاقة وضع PE . وعليه فعند الانتقال من شكل ٦ - ٧ أ الى ج يمكننا أن نكتب (تذكر أن كل ذلك بعد تصادم) :

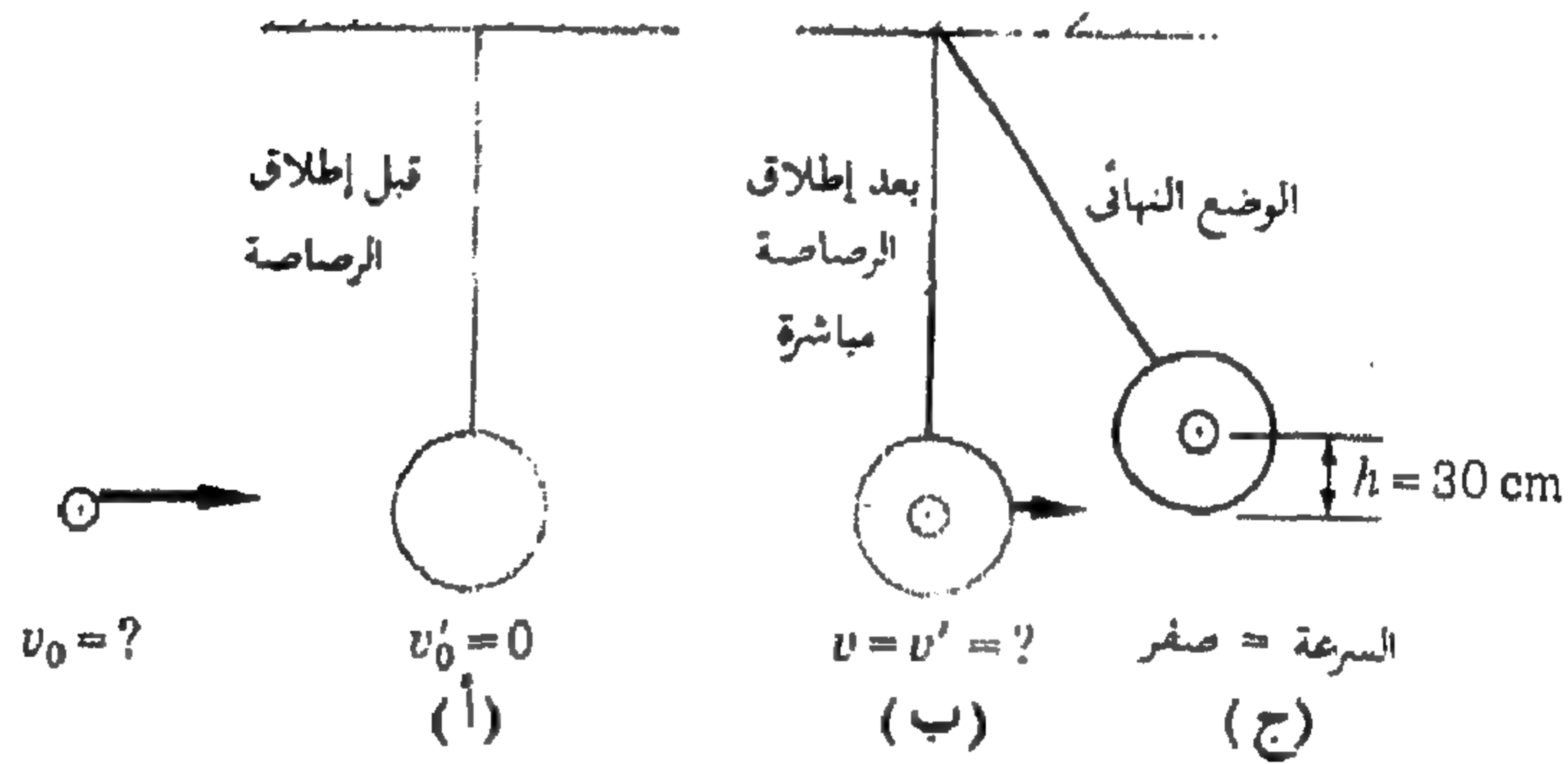
طاقة الوضع عند القمة = طاقة الحركة عند القاع

$$KE \text{ at bottom} = PE \text{ at top}$$

$$\frac{1}{2}(2.000 + 0.010)v^2 = (2.000 + 0.010)(9.8)(0.30)$$

$$v \approx 2.4 \text{ m/s}$$

شكل (٦ - ٧)
كمية التحرك متساوية في (أ)
و (ب) . ولكن ليس في
(ج) . تتحول KE الى PE
عند الانتقال من (ب) الى
(ج) .



وهذه هي سرعة القالب والرصاصة بعد التصادم مباشرة . يجب عليك أن تعوض بالوحدات في المعادلة السابقة للتحقق من وحدات v المذكورة .

والآن عند الانتقال من الجزء أ الى الجزء ب يكون التصادم قد حدث . في هذه الحالة تكون كمية التحرك محفوظة ولكن KE ليست كذلك . واذا رمزنا للسرعة الابتدائية للرصاصة بالرمز v_0 فإن :

كمية التحرك بعد التصادم = كمية التحرك قبل التصادم

$$(0.010 \text{ kg})v_0 + 0 = (2.000 + 0.010)(2.4) \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$v_0 \approx 480 \text{ m/s}$$

وعليه فإن السرعة الابتدائية للرصاصة هي 480 m/s .

٦ - ٥ الدفع النفاث والصاروخي

من الأمثلة المثيرة لاستخدام قانون بقاء كمية التحرك تطبيقه على الدفع النفاث للصواريخ وسفن الفضاء والطائرات النفاثة . ويعتمد عمل جميع هذه الأجهزة على حدوث الارتداد عندما يقذف الجسم جزءا من كتلته خارجه . وتشبه جميع هذه الأجهزة المسدس أو المدفع الذي يرتد عندما ينطلق المقذوف .

يحترق الوقود في المحركات النفاثة والصواريخ وتتكون في هذه العملية غازات ساخنة جدا . وتنطلق الجزيئات الغازية المتحركة بسرعة عالية من مؤخرة المحرك النفاث أو الصاروخي مثل تيار من الرصاصات المنطلقة من بندقية تكرارية خيالية السرعة . وكما ترتد البندقية فإن الصاروخ وسفينة الفضاء ترتد أيضا في الاتجاه المعاكس لحركة الغاز . وحيث أن الجزيئات الغازية قد اكتسبت كمية تحرك في الاتجاه الى الخلف فإن الصاروخ يجب أن يكتسب كمية تحرك في الاتجاه المعاكس (الى الأمام) لأن كمية التحرك محفوظة .

ويبين الفحص الدقيق لهذا النوع من أجهزة الدفع أن داخل المحرك يدفع الجزيئات الغازية الساخنة بحيث تنطلق أساسا في الاتجاه الى الخلف . ولكن ، طبقا لقانون الفعل ورد الفعل لنيوتن ، تبذل الجزيئات الغازية في هذه العملية قوة الى الأمام على المحرك ، دافعة الصاروخ بذلك الى الأمام . وتحدث هاتان القوتان في داخل المحرك نفسه ولا تؤثر على السفينة أى قوة من الخارج . من هذا يتضح أن السفينة لا تدفع نتيجة للفعل المتبادل بين الغازات الساخنة المطرودة والمحيط الجوى . وفي الحقيقة فإن الصاروخ يعمل بأحسن الطرق في الفضاء الخارجى حيث الهواء غير موجود ، إذ أن الهواء يتسبب في ظهور قوة احتكاك تعوق حركة الصاروخ . لذلك فإن الهواء غير مرغوب فيه .

مثال توضيحي ٦ - ٨ : يقذف صاروخ قنطورس Centaur rocket الغاز الساخن من محركه بمعدل قدره 1300 kg/s وكانت سرعة الجزيئات $50,000 \text{ m/s}$ بالنسبة الى الصاروخ . ماهى قيمة الدفع الى الأمام الذى تعطيه الغازات الخارجة للصاروخ ؟

طريقة الحل : الدفع المؤثر على الغاز المنطلق الى الخارج في كل ثانية يعطى بالعلاقة :

$$Ft = mv - mv_0$$

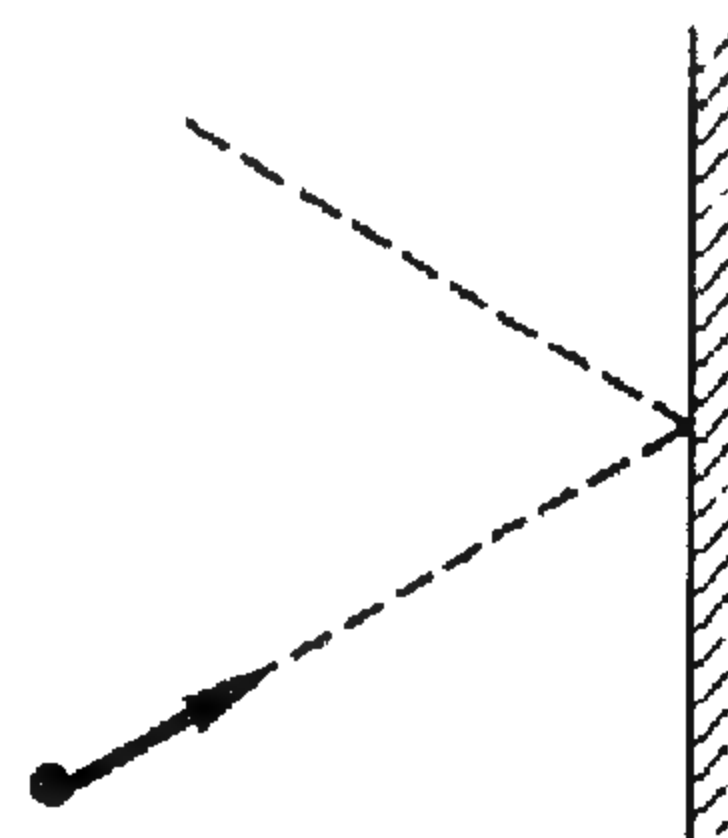
بوضع $t = 1 \text{ s}$ ستكون m هى كتلة الغاز المطرود في الثانية (1300 kg) ، $v = 50,000 \text{ m/s}$ و $v_0 = 0$. وبالتعويض عن هذه الكميات في المعادلة السابقة سنجد أن $F = 65,000,000 \text{ N}$ ، أو حوالى 15 مليون باوند . وهذه هى قوة الفعل اللازم لطرد الغازات الساخنة ، وينشأ الدفع على الصاروخ نتيجة لقوة رد الفعل المساوية في المقدار والمضادة في الاتجاه .

٦ - ٦ ضغط الغاز المثالى

في هذا الجزء سوف نحسب الضغط على جدران وعاء نتيجة لتصادم جزيئات الغاز بهذه الجدران . والصورة في منتهى البساطة من الناحية الكيفية . فاذا نظرنا الى الشكل ٦ - ٨ سنلاحظ أن جزيء الغاز المبين يسقط على جدار الوعاء ثم يرتد عنه متبعا

شكل (٦ - ٨)

يسبب العدد الضخم من جزيئات الغاز المتصادمة مع الجدار بالطريقة المبينة ظهور ضغط الغاز المشاهد .



المسار المنقط . وبالطبع فإنه يؤثر على الجدار بقوة معينة أثناء زمن التصادم ، وتكون قوة رد فعل الجدار المساوية في المقدار والمضادة في الاتجاه هي المسئولة عن التغير في كمية تحركه .

ونظرا لوجود ذلك العدد الضخم من الجزيئات في الغاز عند الضغوط المعقولة فإن بلايين التصادمات بالجدار ستحدث في زمن قدره ثانية واحدة أو أقل . ولهذا فإن القوة الناتجة عن هذه التصادمات ستبدو ثابتة تقريبا . بالإضافة الى ذلك فإن متوسط القوة المؤثرة على الجدار ستكون عمودية عليه . وتعرف القوة العمودية المؤثرة على وحدة المساحات ، أى المتر المربع الواحد أو البوصة المربعة الواحدة .. الخ ، من الجدار بضغط الغاز . وبالرموز ، يعرف الضغط P بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{F}{A} \quad (6 - 4)$$

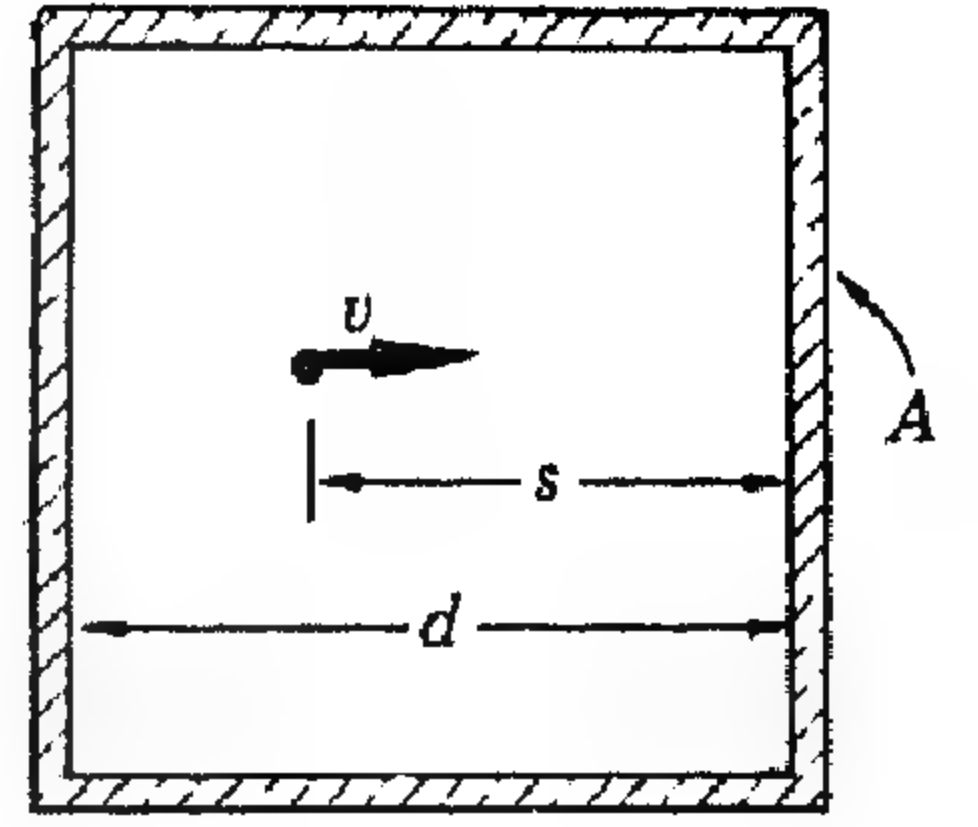
حيث F هي القوة المؤثرة عموديا على المساحة A . ووحدات الضغط هي النيوتن لكل متر مربع أو الباوند لكل بوصة مربعة .. الخ .

تعتبر عملية الحساب المضبوط لضغط الغاز على جدار الوعاء عملية معقدة للغاية في حالة أى غاز حقيقى . ومع ذلك فقد ثبت في النهاية أنه حتى النماذج المبسطة جدا للموقف الفيزيائى الحقيقى تعطى الإجابة الصحيحة تقريبا لمعظم الغازات الحقيقية . ومن المعتاد في علم الفيزياء اجراء الحسابات المبسطة للموقف الفيزيائى أولا . وباردياد فهم العلماء للعمليات الفيزيائية يمكنهم تنقيح حساباتهم باستخدام الصور أو النماذج الأكثر واقعية . وفي بعض الأحيان قد تمر سنين كثيرة قبل أن ينجح العلماء في تعديل النموذج الأصيل غير الواقعى ليطابق العملية الحقيقية كما تثبتها التجربة بدقة أكثر . وينشأ هذا التأخير عادة نتيجة لعجز العلماء عن ابتكار نموذج أكثر واقعية قابل للتحليل الرياضى . بالإضافة الى ذلك فإن الموقف الفيزيائى الحقيقى يكون غامضا في أحيان كثيرة ، وعندئذ ، يجب على العلماء أولا تصور نموذج للعملية الفيزيائية يمكنه أن يحقق الحقائق المشاهدة عمليا .

في الحالة الحالية - حالة ضغط الغازات العادية - تؤدي النماذج البسيطة وحتى غير الواقعية لهذا الموقف الفيزيائى الى نتائج أساسية صحيحة أى نتائج تتفق مع التجربة . وسنقوم الآن بإيجاد ضغط الغاز المثالى باستخدام نموذج بسيط جدا (غير واقعى) ، ومع ذلك فإن نتيجتنا ستكون صحيحة في جميع أساسياتها .

لنفرض أولا أن لدينا غازا في وعاء وأن n_0 عدد الجزيئات في وحدة الحجم . لنفرض كذلك أن ثلث عدد الجزيئات يتحرك في كل من الاتجاهات x ، y ، z ، وسنعتبر أنها جميعا تتحرك بنفس السرعة v . فإذا تأملنا ذلك الثلث من عدد الجزيئات الذى يتحرك في الاتجاه x فإننا سنجد أن نصفه سيكون متحركا في الاتجاه

$+x$ بينما يكون النصف الآخر متحركاً في الاتجاه $-x$. وهكذا فإن سدس عدد الجزيئات سيكون متحركاً في الاتجاه $+x$ وستكون سرعة كل منها v . لنفرض أيضاً أن الجزيئات لا تصادم كل منها مع الآخر .



شكل (٦ - ٩)

تأمل الموقف المبين بالشكل ٦ - ٩ الذي يمثل جسماً يسير في الاتجاه $+x$ نحو جدار مساحته A . الزمن اللازم لكي يصل هذا الجسم إلى الجدار الذي يبعد عنه مسافة قدرها s ثم يصطدم به هو s/v . وكما هو واضح من الشكل فإن عرض الصندوق هو d . لذلك فإن جميع الجزيئات الموجودة بالصندوق والمتحركة في الاتجاه $+x$ سوف تصطدم بالمساحة A في خلال زمن قدره $t = d/v$. وحيث أن حجم الصندوق ، وبالتالي حجم الغاز هو Ad . وكذلك حيث أن عدداً من الجزيئات قدره $\frac{1}{2}v_0$ لوحدة الحجم يتحرك في الاتجاه $+x$ ، فإن العدد الكلي للجزيئات المتحركة في الاتجاه $+x$ سيكون $(\frac{1}{2}v_0)(Ad)$ ، وسوف تصطدم جميع هذه الجزيئات بالجدار الأيمن للصندوق في خلال الزمن d/v .

يفترض أن سدس عدد الجزيئات في الصندوق تتحرك في الاتجاه المبين ، وسوف تصطدم هذه الجزيئات بالجدار خلال الزمن d/v . ونحن نفترض هنا أن عدد الجزيئات في وحدة الحجم هو v_0 وتقرأ « نيوفر » .

فاذا فرضنا أن تصادم الجزيئات بالجدار مرناً تماماً فإن سرعة أى جزيء سوف تنعكس تماماً عند اصطدامه بالجدار . بناءً على ذلك يمكننا كتابة العلاقة التالية لكل جزيء يصطدم بالجدار .

$$2mv = \text{التغير في كمية الحركة}$$

حيث m كتلة الجزيء . أى أن كمية تحرك الجزيء تتغير بمقدار mv عندما يوقفه الجدار كما أن الجزيء يكتسب كمية تحرك اضافية معاكسة قدرها mv ، وبذلك فإن التغير الكلي في كمية التحرك ستكون $2mv$.

وحيث أن عدد الجزيئات التي تصطدم بالجدار في زمن قدره $t = d/v$ هو $(\frac{1}{2}v_0)(Ad)$ ، فإن التغير الكلي في كمية التحرك الذي يسببه الجدار في ذلك الزمن هو :

$$(2mv)(\frac{1}{2}v_0)(Ad)$$

ولكننا نعلم أن الرفع Fl على الجدار يساوى التغير في كمية التحرك ، حيث F متوسط القوة التي تؤثر بها الجزيئات على الجدار .*

* لاحظ أن t هنا ليس زمن التصادم للجزيء الواحد ، ولكنه زمن تصادم عدد كبير من الجزيئات بالحائط وهو في حالتنا هذه يساوى d/v .

وباستخدام حقيقة أن $t = d/v$ نجد أن :

$$F \frac{d}{v} = (2mv) \left(\frac{1}{6}\right) (v_0) (Ad)$$

وبعد تبسيط هذه العلاقة سنحصل على المعادلة التالية لمتوسط الضغط على الجدار :

$$P = \frac{F}{A} = \left(\frac{1}{3}\right) (v_0) (mv^2) \quad (6 - 5)$$

وبدلالة كمية تحرك الجزيء تكتب المعادلة السابقة على الصورة :

$$P = \left(\frac{2}{3}\right) (v_0) \left(\frac{1}{2} m v^2\right) \quad (6 - 6)$$

لاحظ أن ضغط الغاز يساوى ثلثي طاقة الحركة لوحدة الحجم لأن v_0 هو عدد الجزيئات في وحدة الحجم . وسوف نرى في فصل لاحق أن ضغط الغاز يمكن أن يستخدم أيضا كمقياس لدرجة حرارة الغاز . وعليه فيبدو أننا سوف نجد أن درجة الحرارة وطاقة الحركة ترتبطان مع بعضهما ارتباطا وثيقا . وفي الحقيقة فإننا سنعرف أن الجسم الساخن هو ذلك الجسم الذى تمتلك جزيئاته كمية كبيرة من طاقة الحركة .

يتناسب الضغط
مع طاقة حركة
الجزيء

وبالرغم من أن المعادلة (6 - 6) قد اشتقت باستخدام نموذج مفرد في التبسيط فإن النتيجة عامة . فطالما كان الغاز بعيدا عن الشروط التى تؤدي الى اسالته فإن المعادلة (6 - 6) تظل صحيحة كتقريب جيد . وحيث أن الغاز يتبع تماما هذه المعادلة هو غاز مثالى ، فإن المعادلة (6 - 6) هى احدى صور قانون الغاز المثالى . ومن المثير أن تؤدي الطريقة البسيطة التى استخدمناها في الحساب (والتي استخدمها الباحثون الأوائل في علم الفيزياء) الى نتيجة تتفق اتفاقا جيدا مع التجربة . فبالإضافة الى زيف فروض تساوى سرعة الجزيئات وتعامد حركتها والتصادم المرن للجزيئات مع الجدار فإن فرض أن الجزيئات لايتصادم كل منها مع الآخرين بعيد جدا عن الحقيقة . ففي الهواء عند الضغوط العادية يتصادم الجزيء مع الآخر بعد أن يسير مسافة تساوى حوالى 10^{-5} cm .

مثال توضيحي 6 - 9 : اوجد متوسط سرعة جزيئات النيتروجين عند الظروف العيانية علما بأن الضغط الجوى العيارى هو $1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ وعدد جزيئات النيتروجين في حجم قدره 1 m^3 عند الضغط ودرجة الحرارة (0°C) العيارين هو 2.7×10^{25} وكتلة الجزيء الواحد من النيتروجين هي $4.7 \times 10^{-26} \text{ kg}$.

طريقة الحل : يمكننا استخدام المعادلة (6 - 6) لحل هذه المسألة كذلك فإننا نعلم من المعطيات أن $v_0 = 2.7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ، $m = 4.7 \times 10^{-26} \text{ kg}$ ،

* من المعتاد اختصار العبارة « في المتر المكعب » بكتابتها هكذا m^{-3} ، وعليه فإننا نكتب عدد الجزيئات في المتر المكعب على الصورة $2.7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$.

$P = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ وهى جميعا مقاسة فى نظام الوحدات SI . وعليه ، باستخدام المعادلة (٦ - ٦) نجد أن :

$$1 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = \frac{1}{3}(2.7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3})(4.7 \times 10^{-26} \text{ kg})v^2$$

وحيث أن النيوتن هو $1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ ، يمكننا أن نجد من المعادلة السابقة أن :

$$v \approx 490 \text{ m/s}$$

مثال توضيحي ٦ - ١٠ : تطير الطائرات النفاثة التجارية عادة على ارتفاعات تزيد عن 7000 m . ويكون الضغط عند هذا الارتفاع حوالى نصف قيمته عند مستوى سطح البحر . لذلك فإن جميع الطائرات تقريبا مكيفة الضغط لتعويض ذلك . ماذا يحدث لشاغلي الطائرة عند هذا الارتفاع إذا كان الضغط فى المقصورة مساويا لضغط الجو خارج الطائرة ؟

طريقة الحل : نعلم من المعادلة (٦ - ٦) أن $P \sim v_0$ ، حيث v_0 عدد الجزيئات فى وحدة الحجم . وعند الارتفاع 7000 m يكون الضغط (وكذلك v_0) مساويا فقط لنصف قيمته عند مستوى سطح البحر . بناء على ذلك فإن كمية جزيئات الأكسجين التى تدخل الرئتين فى كل مرة يتنفس فيها الشخص تقل إلى حوالى النصف بالمقارنة بالكمية التى يحصل عليها عند مستوى سطح البحر ، أى أن كمية الأكسجين التى يزود بها الجسم تقل إلى النصف . ولتعويض ذلك النقص يتحتم على الشخص أن يتنفس بمعدل أسرع كثيرا من المعتاد ، وعادة ما يكون ذلك متعباً جداً فى حد ذاته . أما إذا لم يفعل الشخص ذلك فإن حيوية جسمه ستقل بدرجة كبيرة . وكثيرا مايلاحظ زوار المناطق الجبلية هذه الظاهرة . أما أبناء هذه المناطق المرتفعة فإن أجسامهم قد تكيفت لمواجهة هذه الظروف بزيادة عدد خلايا الدم الحمراء مثلاً ، مما يسمح لها بأن تعمل بطريقة أفضل مع وجود نقص فى الأكسجين .

ملخص

كمية التحرك الخطى لجسم كتلته m وسرعته v هى mv . كمية التحرك الخطى هى كمية موجهة ويرمز لها عادة بالرمز P . إذا وقع جسم تحت تأثير قوة F لزم من قدره t فإن الدفع المؤثر على الجسم هو Ft . يسبب الدفع تغيرا فى كمية تحرك الجسم . الدفع يساوى التغير فى كمية التحرك ، أى أن $Ft = mv - m_0v_0$. وهذه هى صورة أخرى لقانون نيوتن الثانى للحركة .

مجموعة الأجسام التى لا تؤثر عليها أية قوة محصلة خارجية يمكن اعتبارها معزولة طالما كنا نهتم بالحركة الانتقالية . فى حالة النظام المعزول تكون كمية تحرك الأجسام المكونة له ثابتة ، وهذا هو قانون بقاء كمية التحرك الخطى . هذا القانون هام جدا فى تحليل تصادم الأجسام . طاقة الحركة محفوظة فى حالة التصادم المرن تماما . فى كثير من الأحيان تفقد كمية كبيرة من طاقة الحركة أثناء التصادم متحولة الى طاقة حرارية أو صور أخرى من الطاقة .

إذا أثرت قوة قدرها F عموديا على سطح مساحته A فإن مقدار الضغط على هذا السطح نتيجة لتلك القوة هو $P = F/A$. يمارس الغاز الموجود في وعاء ضغطا على الجدران نتيجة لتصادم جزيئات الغاز بالجدران . ضغط الغاز المثالي الذي يحتوى على عدد من الجزيئات مقداره ν_0 في وحدة الحجم هو $P = \left(\frac{2}{3}\right)(\nu_0) \left(\frac{1}{2}mv^2\right)$. في هذه العلاقة v هو متوسط السرعة اللاانجائية لجزيء كتلته m .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

- ١ - تعريف كمية التحرك الخطى وحسابه لجسم بمعلومية المعطيات الكافية . إعطاء أمثلة تبين كيف تعتمد كمية التحرك على السرعة أو الكتلة أو كليهما .
- ٢ - إيجاد التغير في كمية تحرك جسم يقع تحت تأثير متوسط قوة معينة لزمن معلوم . تعريف الدفع وإيجاد العلاقة بينه وبين كمية التحرك الخطى . حساب الدفع اللازم لإحداث تغير معين في كمية التحرك .
- ٣ - ذكر قانون بقاء كمية التحرك مع الاهتمام بتوضيح أهمية الكلمات « نظام معزول » . اشرح لماذا وتحت أى ظروف يكون هذا القانون نافعا حتى إذا لم يكن النظام معزولا تماما .
- ٤ - تحليل تصادم جسمين يلتصقان معا عند التصادم ، أى المواقف المشابهة لتلك المبينة في المثال التوضيحي ٦ - ٣ .
- ٥ - تحليل المواقف التى ينفجر فيها جسم موجود أصلا في حالة السكون الى قطعتين أو يرتد ، أى المواقف الشبيهة بالمثال التوضيحي ٦ - ٤ .
- ٦ - تحليل المواقف التى يتحرك فيها جسمان في خط مستقيم واحد ويتصادمان تصادما مرنا تماما ثم يستمران في الحركة في نفس الخط المستقيم .
- ٧ - شرح الفرق بين التصادم المرن وغير المرن . اشرح بأسلوبك الخاص كيف تتصرف الكرة المرتدة في هذه الحالة . ذكر الأسباب المعقولة لحقيقة أن طاقة الحركة ليست محفوظة في معظم التصادمات .
- ٨ - شرح المواقف التى يصطدم فيها الجسم المتحرك بآخر ثابت ثم يطمر فيه وكيف أن طاقة الحركة المتبقية تتحول الى طاقة وضع أو تفقد في بذل شغل الاحتكاك . يمكن أن يؤخذ البندول القذفي كموقف نموذجي .
- ٩ - شرح مبدأ عمل الصواريخ والمحركات النفاثة والأجهزة المشابهة التى تدفع باستخدام المنفذ .
- ١٠ - تعريف الضغط وشرح لماذا يمارس الغاز الموجود في وعاء ضغطا على جدران الوعاء . وضع بأسلوبك الخاص لماذا يجب أن يعتمد الضغط على ν_0 ، m ، v .
- ١١ - القدرة على حل المسائل البسيطة المشابهة للمثال التوضيحي ٦ - ٩ بمعلومية العلاقة بين P ، ν_0 ، v ، m .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

كمية التحرك الخطى : $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$

الدفع : $Ft = m\mathbf{v} - m_0\mathbf{v}_0$

النظام المعزول

بقاء كمية التحرك الخطى

التصادم المرن وغير المرن

الارتداد

بندول بالستى (ballistic) - بندول قذفي

الدفع النفثي

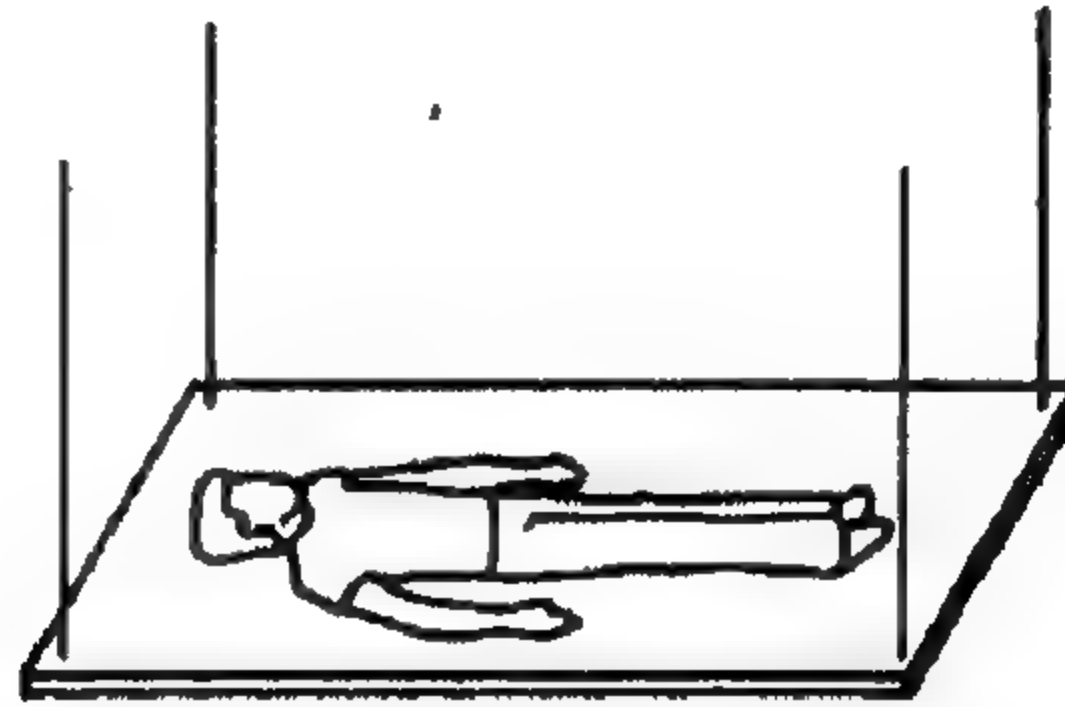
$$P = F/A$$

غاز مثالي

$$P = \left(\frac{2}{3}\right)(\nu_0) \left(\frac{1}{2}mv^2\right)$$

اسئلة وتخمينات :

- ١ - اشرح باستخدام معادلة الدفع لماذا لا يكون من الحكمة أن تحتفظ برجليك مستقيمتين صلبتين عندما تقفز من فوق حائط أو منصدة الى الأرض . ماهي العلاقة بين هذا وبين الاعتقاد السائد بأن احتمال اصابة الشخص الثمل عند السقوط أقل من احتمال اصابة الشخص غير الثمل ؟
- ٢ - اشرح مبدأ عمل مصادمات السيارة الماصة للصدمات وأجهزة امتصاص الصدمات المشابهة باستخدام معادلة الدفع .
- ٣ - عند اطلاق مدفع كبير فإنه يرتد مسافة معينة ضد جهاز تخميد الصدمة . لماذا يكون من الضروري تصميم حامل المدفع بحيث « يعمل » بهذه الطريقة ؟
- ٤ - عند إسقاط كرة على أرضية صلبة فإن كمية تحركها تكون متجهة الى أسفل ، وبعد الارتداد تصبح كمية تحركها متجهة الى أعلى . من الواضح أن كمية تحرك الكرة ليست محفوظة عند التصادم بالرغم من أن الكرة قد ترتد الى نفس الارتفاع الذي اسقطت منه . هل يتفارض هذا مع قانون بقاء كمية التحرك ؟
- ٥ - اخترع جهازا يمكن أن يكون له ، على الأقل لحظيا ، طاقة حركة ولا تكون له كمية تحرك . هل من الممكن تصميم جهاز له كمية تحرك وليست له طاقة حركة ؟ اشرح .
- ٦ - عندما يحرر بالون أطفال مملوء بالهواء يسمح للهواء بالخروج فإن البالون ينطلق في الهواء . اشرح لماذا يتحرك البالون بهذه الطريقة . ماهو وجه التشابه بين الصاروخ والبالون ؟



شكل (م ٦ - ١)

٧ - عندما ينبض قلبك فإنه يسبب تدفق الدم في جسمك . ويمكن مراقبة هذه الحركة بوضع الشخص على لوح معلق في أسلاك كما هو مبين في شكل م ٦ - ١ . عندئذ يتحرك اللوح حركات صغيرة تعكس عملية القلب ، وتسجل حركات اللوح باستخدام أجهزة حساسة للحصول على معلومات عن عمل القلب ويسمى هذا الجهاز رسم القلب القذفي () . اشرح لماذا تعطى حركة اللوح معلومات عن عمل القلب .

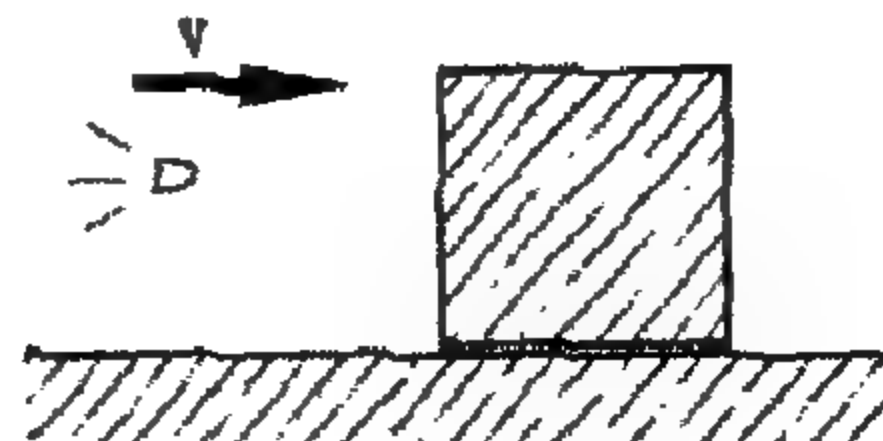
٨ - يصاب لاعب البيسبول بالكابوس التالي . حبس اللاعب مصادفة في شاحنة سكة حديد صندوقية . ولحسن الحظ كان هذا اللاعب يصطحب معه كرتة ومضربه . ولكي يبدأ اللاعب حركة العربة فإنه يقف في احدى نهايتيها ويضرب الكرة في اتجاه النهاية الأخرى عندئذ يسبب الدفع الذي يؤثر به الكرة عند اصطدامها بنهاية العربة حركتها الى الامام . وحيث أن الكرة ترتد دائما وتتدحرج على الأرضية نحو اللاعب فإنه يكرر هذه العملية مرات ومرات . وفي نهاية الأمر تكتسب العربة سرعة عالية . ويقتل اللاعب عند اصطدام الشاحنة الصندوقية بأخرى ساكنة موجودة على نفس خط السكة الحديد . حلل هذا الحلم من وجهة النظر الفيزيائية المناسبة .

٩ - اشرح كيف تقفز الفولة المكسيكية القفازة بدون تدخل خارجي .

- ١٠ - ذبابة محبوسة في داخل وعاء خفيف الوزن مغلق تماما . هل تستطيع أن تعرف ما إذا كانت الذبابة ساكنة أو طائرة بوزن الوعاء ؟ اشرح .
- ١١ - قفز رجل وزنه 200 lb من فوق سطح منزل ارتفاعه 30 ft عن سطح الأرض . ماهي القوة بالتقريب التي يجب أن تتحملها ساقيه عندما يصل الى الأرض ؟ (ق)
- ١٢ - سقط طفل كتلته 10 kg من نافذة والتفتت سيدة موجودة على بعد 15 m أسفل النافذة . قدر القوة التي يتعرض لها الطفل عند التقائه . (ق)
- ١٣ - ماهي القوة التي تؤثر بها قطرة مطر متوسطة الحجم على رأس رجل اصلع ؟ (ق)
- ١٤ - يندفع عمود افقى من الماء من خرطوم الى نافذة بسرعة قدرها 5 m/s ومعدل قدره 30 g/s . ماهي القوة بالتقريب التي يؤثر بها عمود الماء على النافذة ؟ (ق)
- ١٥ - يهب الريح على لافتة بسرعة قدرها 30 m/s . فإذا كانت كتلة 1 m² من الهواء (أى الكثافة) هي 1.29 kg/m³ ، قدر القوة التي يؤثر بها الريح على وحدة المساحات من اللافتة . (ق)
- ١٦ - قدر القوة التي يؤثر بها رأس سيدة على رقبتها إذا اصطدمت شاحنة محملة تسير بسرعة قدرها 20 mi/h (9 m/s) سيارتها الساكنة من الخلف . لماذا يؤدي مثل هذا النوع من الحوادث عادة الى ما يسمى اصابة ضربة السوط ؟ ستحتاج عندئذ الى تقدير كتلة رأس السيدة والزمن اللازم لتسارع . (ق)
- ١٧ - لنفرض أنك وضعت يدك منبسطة على منضدة ثم اسقطت عليها كتلة معملية مسطحة قدرها 1.0 kg من ارتفاع قدره 0.5 m . قدر متوسط القوة التي تؤثر بها الكتلة على يدك . (ق) لماذا يكون احتمال الإصابة كبيرا في هذه الحالة بالرغم من أنك تستطيع التقاط الكتلة بسهولة عند اسقاطها من هذا الارتفاع ؟

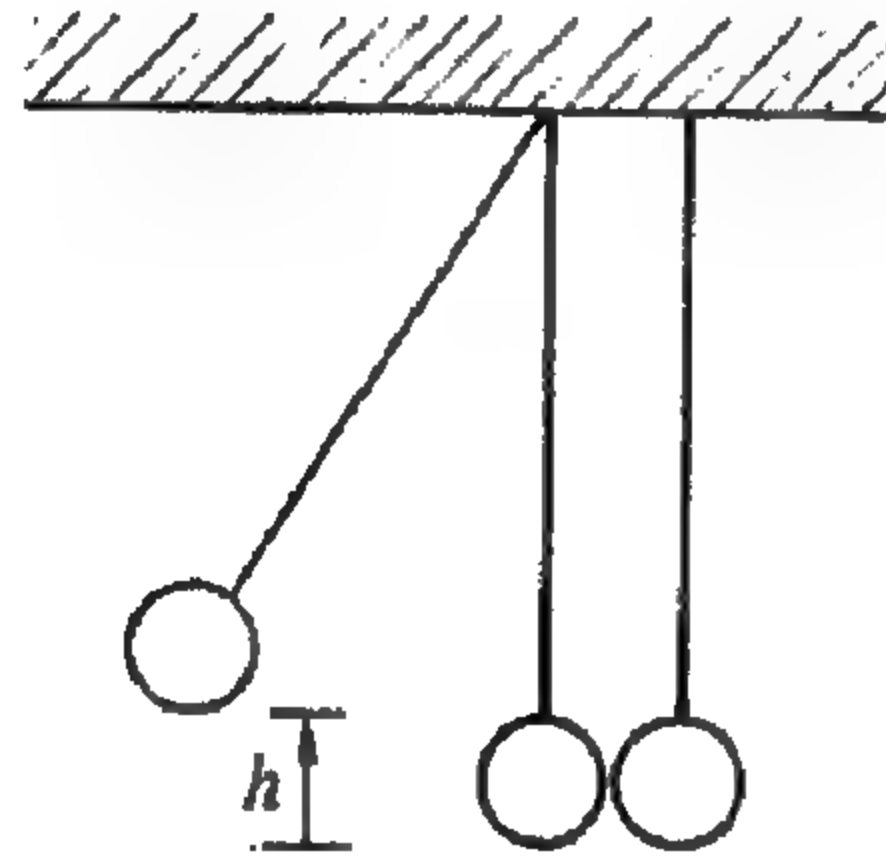
مسائل :

- ١ - اسقطت كتلة مقدارها m من ارتفاع قدره h . ماهي كمية تحركها قبل اصطدامها بالأرض مباشرة ؟ إهمل تأثيرات الاحتكاك .
- ٢ - أثبت أن العلاقة بين كمية التحرك الخطى p وطاقة الحركة KE لكتلة قدرها m هي $KE = p^2/2m$.
- ٣ - باستخدام معادلة الدفع . (أ) اوجد متوسط القوة اللازمة لإيقاف سيارة وزنها 3200 lb في زمن قدره 5.0 s اذا كانت السرعة الابتدائية للسيارة 80 ft/s . (ب) بفرض أن التسارع منتظم ، ماهي المسافة التي تقطعها السيارة في هذا الزمن ؟
- ٤ - اصطدمت سيارة كتلتها 1500 kg تتحرك بسرعة قدرها 20 m/s بحائط فتوقفت بعد مسافة قدرها 3.0 m . بفرض أن التقاصر منتظم ، ماهو الزمن اللازم لتوقف السيارة ؟ استخدم معادلة الدفع لإيجاد قوة الإيقاف التي تؤثر عليها .
- ٥ - اصطدمت كرة كتلتها 120 g متحركة بسرعة قدرها 18 m/s بحائط عموديا وارتدت في خط مستقيم الى الخلف . وبعد أن تلامست الكرة بالحائط تحرك مركزها مسافة اضافية قدرها 0.27 cm نحو الحائط . بفرض أن التقاصر الذى يسببه الحائط منتظم ، أثبت أن زمن التماس مع الحائط هو 2×0.00030 s ماهو متوسط القوة التي تؤثر بها الكرة على الحائط ؟
- ٦ - تصادمت كرتان متماثلتان وكانت الكرة الأولى متحركة الى اليمين بسرعة قدرها 10 m/s بينما الكرة الثانية ساكنة . اوجد اتجاه ومقدار سرعة الكرتين اذا التصقا سويا بعد التصادم .
- ٧ - يمثل الشكل م ٦ - ٢ رصاصة كتلتها 20 g تتحرك بسرعة قدرها 5000 cm/s ثم تصطدم بقلب كتلته 7000 g مستقر في حالة السكون على منضدة . أوجد (أ) سرعة القلب بعد التصادم ، (ب) قوة الاحتكاك بين المنضدة والقلب إذا تحرك الجسم 1.5 cm قبل التوقف .



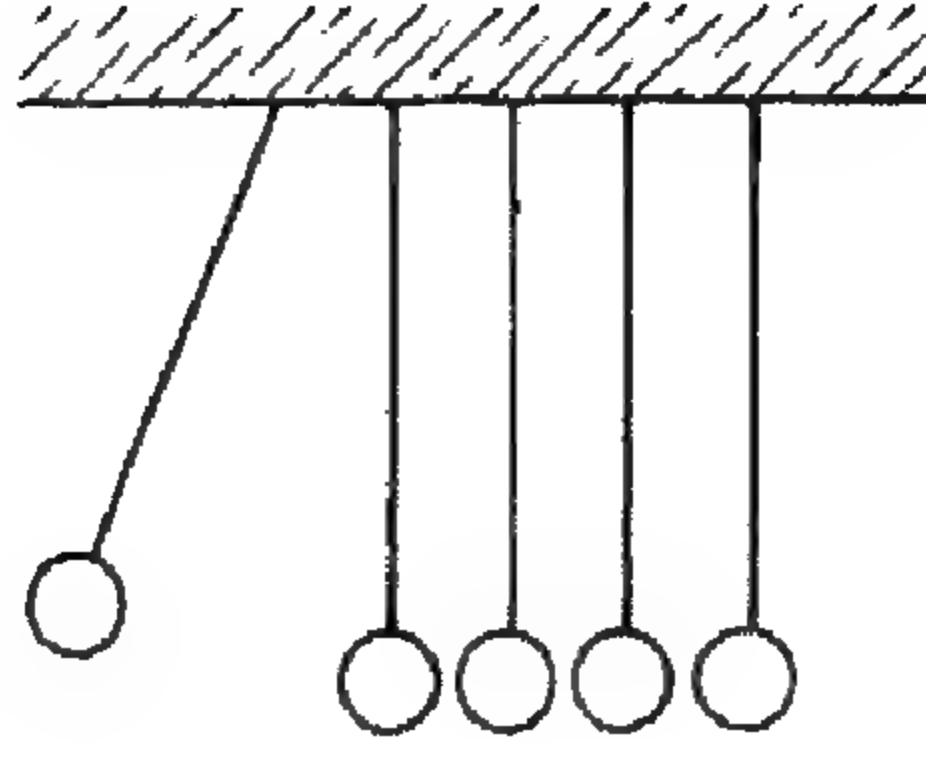
شكل (م ٦ - ٢)

- ٨* - في الشكل م ٦ - ٢ تلزم قوة أفقية قدرها 0.70 N لجذب قالب كتلته 5000 g على المنضدة بسرعة ثابتة . أوجد سرعة الرصاصة التي كتلتها 20 g والمبينة بالشكل اذا طمرت الرصاصة في القالب وسببت انزلاقه مسافة قدرها 1.5 m قبل أن تصل الى السكون .
- ٩ - وضع قالب كتلته 2.0 kg على فتحة صغيرة في منضدة ، ثم اطلق رجل رصاصة كتلتها 15.0 g من أسفل المنضدة على القالب خلال الفتحة التي يستقر عليها . ماهي سرعة الرصاصة اذا ارتفع القالب مسافة قدرها 1.30 m فوق المنضدة ؟
- ١٠ - انفصلت رائدة فضاء كتلتها 60 kg في الفضاء عن سفينتها الفضائية وكانت تبعد مسافة قدرها 15.0 m عن السفينة وساكنة بالنسبة اليها . وفي محاولة للرجوع قذفت الرائدة مفتاح ربط كتلته 500 g بسرعة قدرها 8.0 m/s في الاتجاه البعيد عن السفينة . ماهو الزمن اللازم لرجوع رائدة الفضاء الى السفينة .
- ١١ - تترن بطيخة كتلتها 2.0 kg على رأس رجل أصلع . وأطلقت زوجته سهما-كتلته 50 g على البطيخة بسرعة قدرها 30 m/s فنفذ السهم خلالها وخرج بسرعة قدرها 18 m/s . أوجد سرعة البطيخة عندما تطير من فوق رأس الرجل .
- ١٢ - أراجع الى الشكل م ٦ - ٢ . جذب البندول الأيسر جانباً الى الموضع المبين ثم أعتق وسمح له بالتصادم مع البندول الآخر الذي كان ساكناً عند ذلك . (أ) ماهي سرعة الكرة اليسرى قبل التصادم مباشرة ؟ (ب) واذا التصقت الكرتان بعد التصادم ، فما هو الارتفاع الذي تصل اليه المجموعة بدلالة h ؟ افترض أن الكرتين متساويتى الكتلة .



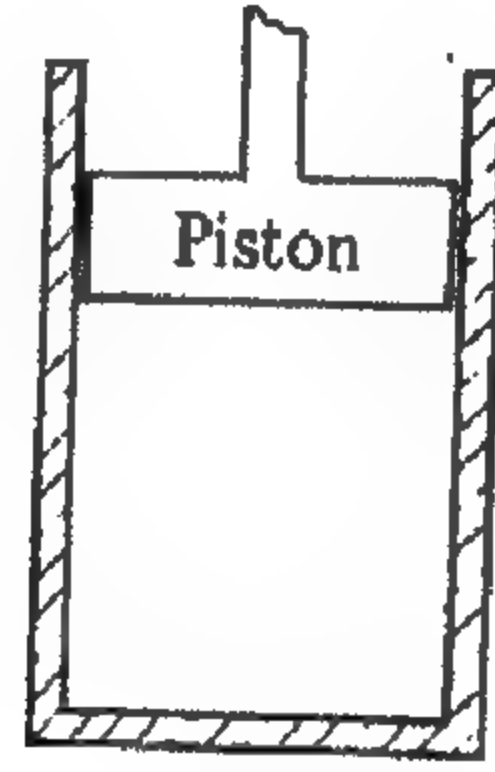
شكل (م ٦ - ٣)

- ١٣ - تنتج المفاعلات النووية كثيراً من النيوترونات السريعة . ولإبطاء هذه النيوترونات يسمح لها بالتصادم مع جسيمات ذات كتلة قريبة من كتلة النيوترونات . لنفرض أن نيوترونا سرعته u يصطدم تصادماً مباشراً مع بروتون ساكن . ماهي سرعة النيوترون بعد التصادم اذا كان التصادم مرناً تماماً علماً بأن كتلتى النيوترون والبروتون متساويتان تقريباً ؟
- ١٤ - الكتلتان المبيتان في شكل م ٦ - ٣ متماثلتان . ازيجت الكتلة اليسرى كما هو مبين بالشكل ثم اعتقت فاصطدمت بالكتلة الأخرى تصادماً مرناً تماماً . (أ) الى أى ارتفاع (بدلالة h) تصل الكتلة بعد التصادم ؟ (ب) وإلى أى ارتفاع تصل الكتلة اليسرى ؟
- ١٥ - في الشكل م ٦ - ٣ ازيجت الكتلتان الى ارتفاع قدره h ، بحيث كانت ازاحة احدهما الى اليسار كما هو مبين ، بينما كانت ازاحة الأخرى الى اليمين . ثم حررت الكتلتان في نفس اللحظة فتصادمتا تصادماً مرناً تماماً عند القاع . الى أى ارتفاع تصل كل من الكتلتين بعد التصادم ؟ افترض أن الكتلتين متماثلتين .
- ١٦* - كما هو موضح في الشكل م ٦ - ٣ جذبت الكتلة اليسرى جانباً ثم اعتقت ، وكانت سرعتها عند القاع u_0 . عندئذ تصادمت هذه الكتلة مع الكتلة اليمنى تصادماً مرناً تماماً . أوجد سرعة كل من الكتلتين بعد التصادم مباشرة اذا كانت الكتلة اليسرى ثلاثة أضعاف الكتلة اليمنى .
- ١٧** - كرر المسألة ١٦ اذا كانت الكتلة اليسرى ثلث الكتلة اليمنى .
- ١٨** - يتصادم الكترون ($m = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$) متحرك بسرعة قدرها $2.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ تصادماً مباشراً مع ذرة ايدروجين $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ سرعتها الابتدائية تساوى صفراً . أوجد السرعة النهائية لذرة الايدروجين بفرض أن التصادم مرناً تماماً وأن الحركة على نفس الخط المستقيم .



شكل (م ٦ - ٤)

- ١٩ - يباع الجهاز المبين بالشكل م ٦ - ٤ كبدة جديدة، وجميع كتلة متساوية . عندما تزاوح احدى الكتل جانبا كما هو مبين ثم تعتق فإن الكتلة المقابلة تطير الى الخارج بينما تحتفظ جميع الكتل الأخرى بوضعها . (أ) إثبت أن هذه النتيجة متوقعة اذا كانت التصادمات مرنة تماما ؟ ماذا يحدث إذا ازيحت كتلتان جانبا ثم اعتقتا بدلا من واحدة ؟
- ٢٠ - افترض أن نصف عدد جزيئات غاز قد أزيلت من الوعاء دون تغيير متوسط طاقة حركة الجزيء في داخل الوعاء . بأي نسبة يتغير ضغط الغاز ؟
- ٢١ - تحتوي غرفة بكباس على عدد من الجزيئات عند الضغط الجوي كما هو مبين بالشكل م ٦ - ٥ فاذا دفع الكباس الى أسفل بحيث لا تتغير طاقة حركة الجزيئات تغيرا محسوسا ، فما هو الضغط في الوعاء عندما يصبح الحجم مساويا للحجم الأصلي ؟



(١) شكل (م ٦ - ٥)

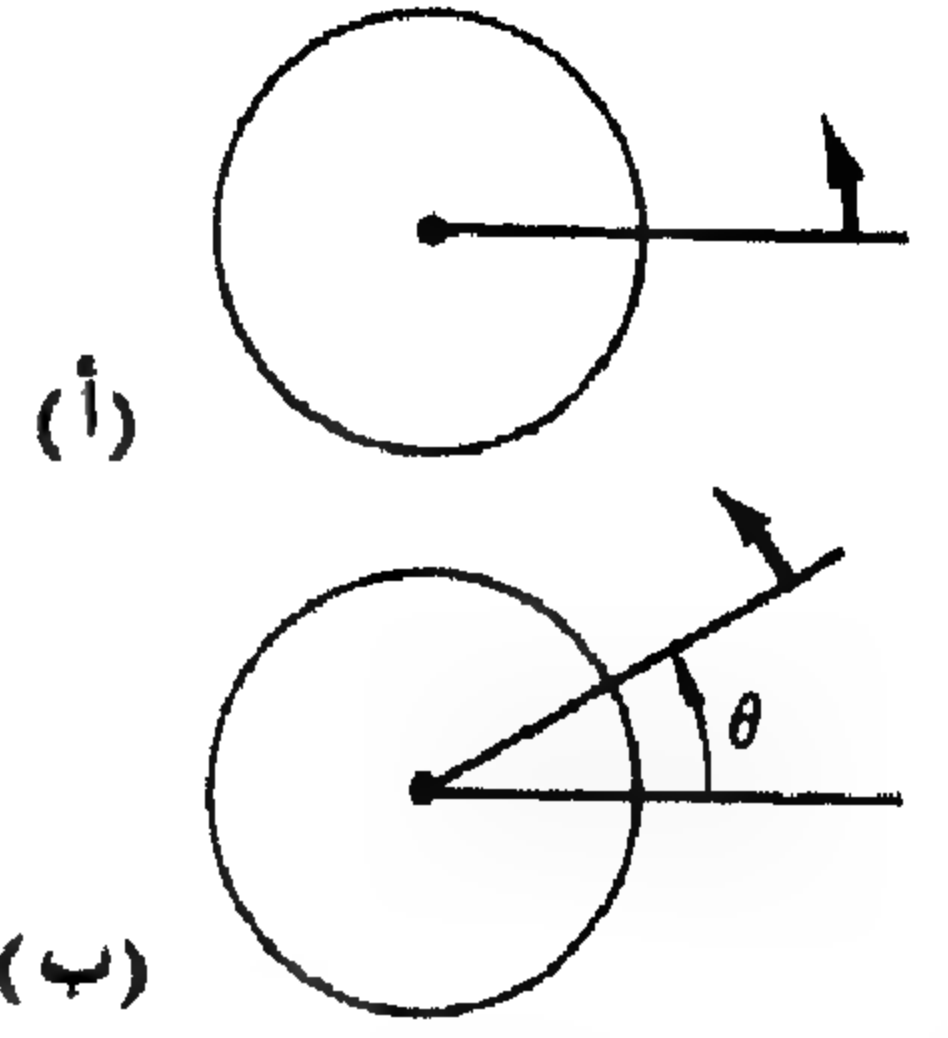
الفصل السابع

الحركة الزاوية والقوة الجاذبة المركزية

في هذا الفصل سنوسع دراستنا للحركة لكي تشمل الأجسام التي تتحرك في مسارات دائرية . وكثيرا ما نقابل هذا النوع من الحركة في الطبيعة ، لذلك فإن معرفتها ضرورية لفهم تلك الموضوعات المتنوعة كحركة الأجسام في النظام الشمسي وتركيب الذرات . وسوف نطبق مبادئ الحركة الدائرية على مختلف المسائل الفيزيائية وكذلك سوف نناقش موضوع انعدام الوزن .

٧ - ١ المسافة الزاوية (أو البعد الزاوي) θ

ناقشنا حتى هذا الفصل الحركة في خط مستقيم فقط . ومع ذلك فإن الحركة في دائرة شائعة جدا وذات أهمية كبيرة . وفي هذا الفصل سوف ندرس هذا النوع من الحركة . لنفرض أن لدينا عجلة مثبتة في محور يمر بمركزها كما هو مبين في شكل ٧ - ١ عند الانتقال من شكل ٧ - ١ إلى ب تكون العجلة قد دارت زاوية قدرها θ . هناك ثلاث طرق مختلفة يمكن أن يقاس بها هذا الدوران .



(ب)

شكل (٧ - ١)

تصف الزاوية θ المسافة الزاوية التي لفها العجلة .

الطريقة الأولى هي أن تقاس θ بالدرجات . فإذا دارت العجلة دائرة كاملة فإن θ تكون 360° . وهذه الطريقة لقياس مقدار دوران العجلة معروفة لنا جيدا . كذلك فإن الطريقة الثانية لقياس θ شائعة أيضا في الحياة اليومية . فعندما تدور العجلة دائرة كاملة يقال أن (دورة revolution) $\theta = 1 \text{ rev}$ من الواضح أن :

$$1 \text{ rev} = 360^\circ$$

الطريقة الثالثة لقياس θ ذات أهمية خاصة في العلم . وتعرف هذه الطريقة لقياس الزوايا ، والمسماة بالمقياس النصف قطري ، بدلالة النسبة بين طولين . وإذا رجعنا إلى الشكل ٧ - ٢ فإننا سنرى أن النقطة A على العجلة قد تحركت على قوس طوله s عندما دارت العجلة زاوية θ . وإذا كان نصف قطر العجلة هو r يمكننا وضع التعريف التالي :

$$\theta = \frac{\text{طول القوس}}{\text{نصف القطر}} = \text{بالمقياس النصف قطري}$$

الزوايا بالمقياس النصف قطري

$$\theta = \frac{s}{r} \text{ radians} \quad (٧ - ١)$$

لاحظ أن θ هي ببساطة نسبة ، وعليه فلا وحدات لها . وبالرغم من ذلك فإننا نقول مثلا أن « الزاوية هي $\pi \text{ rad (radians)}$ أو 180° أو $\frac{1}{2} \text{ rev}$ » لتوضيح كيف تقاس الزوايا . وحيث أن $s = 2\pi r$ للفة الواحدة من العجلة ، فإننا نقول أن :

$$1 \text{ rev} = 360^\circ = 2\pi \text{ rad}$$

مثال توضيحي ٧ - ١ : لدينا زاوية معينة تساوي 70° . اوجد مكافئها بالزوايا النصف قطرية والدورات .

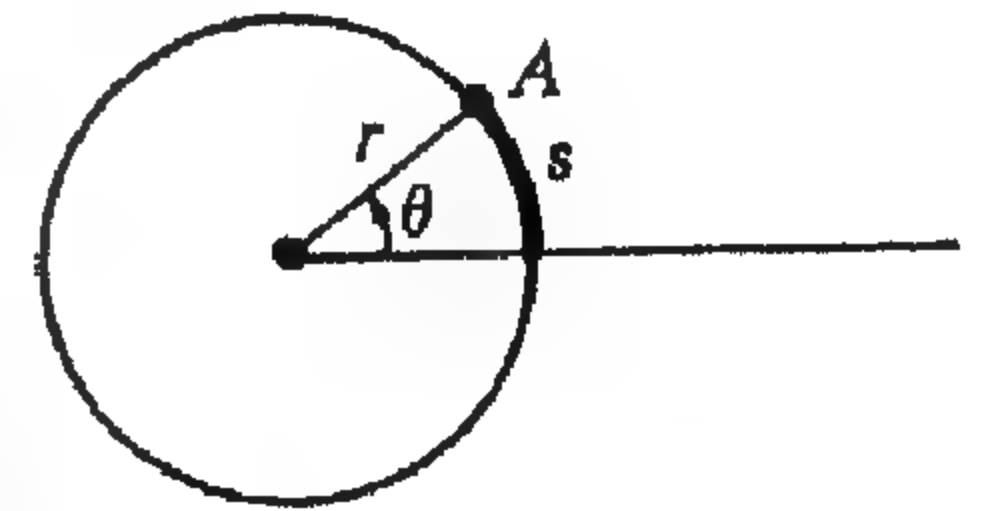
طريقة الحل : تبين لنا العلاقات بين مختلف المقاييس الزاوية أن :

$$70 \text{ deg} = (70 \text{ deg}) \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{360 \text{ deg}} \right) = 1.22 \text{ rad}$$

$$70 \text{ deg} = (70 \text{ deg}) \left(\frac{1 \text{ rev}}{360 \text{ deg}} \right) = 0.194 \text{ rev}$$

و

شكل (٧ - ٢)
في المقياس النصف قطري
 $\theta = s/r$



مثال توضيحي ٧ - ٢ : يمثل الشكل ٧ - ٣ خيطا ملفوفا حول عجلة نصف قطرها 20 cm . بأى زاوية يجب أن تلف العجلة لكي تفك 30 cm من الخيط ؟
طريقة الحل : عندما تفحص الشكل ٧ - ٣ يمكنك أن تقنع نفسك بصحة مايلي :
عندما تدور نقطة على حافة العجلة على قوس طوله s فإن طول الخيط المفكوك سيكون أيضا s . كذلك فإن المعادلة (٧ - ١) تبين لنا أن :

$$\theta \text{ in radians} = \frac{s}{r}$$

وفي هذه الحالة $r = 20 \text{ cm}$ ، $s = 30 \text{ cm}$ إذن :

$$\theta \text{ in radians} = \frac{30}{20} = 1.50 \text{ rad}$$

$$\theta = (1.50 \text{ rad}) \left(\frac{360 \text{ deg}}{2\pi \text{ rad}} \right) = 86 \text{ deg} \quad \text{أو}$$

شكل (٧ - ٣)
ماهر مقدار دوران العجلة
اللازم لفك 30 cm من
الخيط ؟

٧ - ٢ السرعة الزاوية

عندما نقول أن عجلة تدور بمعدل 800 rev/min فإننا نعطي سرعتها الزاوية ، وهذا يعنى أننا نذكر مقدار دورانها في زمن معين . ويعرف متوسط السرعة الزاوية لعجلة دائرة بالزاوية التي تدورها العجلة مقسومة على الزمن اللازم لدورانها هذه الزاوية . ومعادلة متوسط السرعة الزاوية هي :

متوسط السرعة
الزاوية

(٧ - ٢)

$$\bar{\omega} = \frac{\theta}{t}$$

حيث θ هي الزاوية التي تدورها العجلة في زمن t (ω هي الحرف اليوناني أو ميجا) وكما نرى فإن وحدات ω هي وحدات الزاوية مقسومة على وحدات الزمن . فمثلا يمكن أن تكون وحدات ω الدرجة في الثانية أو الدورة في الدقيقة أو الزاوية النصف قطرية في الثانية .. الخ .

ويتشابه تعريف متوسط السرعة الزاوية كثيرا مع تعريفنا للسرعة في حالة الحركة الخطية ، إذ أن $\bar{v} = s/t$ ، حيث s هي المسافة الخطية المقطوعة في زمن t وسنرى فيما يلي أن لكل من معادلاتنا الخمس للحركة الخطية نظير في حالة الحركة الدائرية .

في الحركة الخطية فرقنا بين متوسط السرعة والسرعة اللحظية وهذا الفرق هام أيضا في الحركة الزاوية . يعرف متوسط السرعة في حالة الحركة الخطية بنظير المعادلة (٧ - ٢) . وتستنتج السرعة اللحظية بقياس المسافة المقطوعة في فترة زمنية قصيرة جدا للدرجة أن السرعة لا يمكنها أن تتغير تغيرا محسوسا في خلال ذلك الزمن .

* في الدراسة الأكثر تقدما تعطى السرعة الزاوية اتجاهها بحيث تكون كمية موجهة . ومع ذلك ففي حالة الدوران في مستوى يكون مقدار معدل الحركة الزاوي والسرعة الزاوية متساويين ، كذلك لا يتغير اتجاه السرعة الزاوية .

ويكتب هذا بالطريقة الآتية ، حيث ω هي السرعة الزاوية اللحظية :

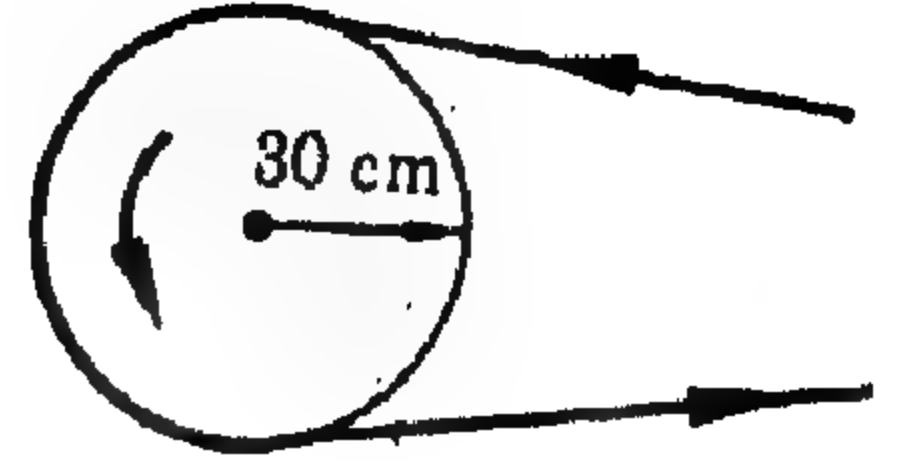
(٣ - ٧)

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

السرعة الزاوية
اللحظية

في هذه العلاقة $\Delta \theta$ هي المسافة الزاوية الصغيرة التي تتحركها العجلة في زمن صغير قدره Δt ، وتعني \lim أننا نأخذ قيمة هذه النسبة عندما تقترب الفترة الزمنية Δt من الصفر ، كما نوقش في الفصل الثاني .

مثال توضيحي ٧ - ٣ : في الشكل ٧ - ٤ تدور العجلة بمعدل 240 rev/min ، (أ) ماهي الزاوية التي تدورها العجلة في 10 s ؟ (ب) وإذا كان نصف قطر العجلة 30 cm ، فما هو طول السير الذي تجذبه العجلة في خلال ذلك الزمن ؟



شكل (٧ - ٤)

عندما تدور العجلة فإنها تلف أحد طرفي السير وتلف الطرف الآخر .

طريقة الحل : (أ) حيث أن $\bar{\omega} = 240 \text{ rev/min}$ و $t = 10 \text{ s}$ يمكننا بتحويل جميع وحدات الزمن إلى دقائق أن نجد من المعادلة (٧ - ٢) أن :

$$\theta = \bar{\omega} t = (240 \text{ rev/min})(\frac{10}{60} \text{ min}) = 40 \text{ rev} = 80\pi \text{ rad}$$

(ب) تذكر أن المعادلة (٧ - ١) يمكن أن تستخدم لإيجاد طول الخيط أو السير الذي تلفه العجلة . وكما في المثال التوضيحي ٧ - ٢ ، فإن طول السير الذي تلفه العجلة في الزمن t هو :

$$s = \theta r$$

بشرط أن تقاس θ بالزاوية النصف قطرية . وحيث أننا وجدنا أن $\theta = 80\pi$ ، ونظراً لأن $r = 30 \text{ cm}$ من المعطيات ، فإن :

$$s = (80\pi \text{ rad})(0.30 \text{ m}) = 75.4 \text{ m}$$

لاحظ أن مصطلح الزاوية النصف قطرية (radian) لم يدخل في المعادلة . وكما نرى من التعريف فإنها ليست وحدة بالمعنى الحرفي للكلمة .

٧ - ٣ التسارع الزاوي α

عرف متوسط التسارع الخطي في الفصل الثاني بالعلاقة :

$$a = \frac{v_f - v_0}{t}$$

وتقيس هذه الكمية المعدل الذي يتسارع أو يتقاصر به الجسم المتحرك . والكمية $v_f - v_0$ هي التغير في السرعة خلال الزمن t . ومن المرجح أنك تذكر أن الوحدات النموذجية للتسارع هي المتر في الثانية المربعة والقدم في الثانية المربعة .

وفي حالة الأجسام المتحركة حركة دورانية نهتم أساساً بطريقة تسارعها أو (تباطؤها) . بناء على ذلك فإننا نهتم في هذه الحالة بالتسارع الزاوي ، أي بمعدل

تغير السرعة الزاوية . يعرف متوسط التسارع الزاوي α (الفا) للعجلة الدائرية أو أى جسم دائر آخر بالعلاقة :

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} \quad (٧ - ٤) \quad \text{متوسط التسارع الزاوي}$$

وحداته هي نفس وحدات السرعة الزاوية مقسومة على وحدات الزمن .
فمثلا اذا كان الزمن t مقاسا بالثواني والسرعة الزاوية ω مقاسة بالزاوية النصف قطرية في الثانية ، فإن التسارع الزاوي سيكون مقاسا بالزاوية النصف قطرية في الثانية في الثانية . وبالرغم من أنه ليس من الخطأ أن تقاس العجلة الزاوية ω بالزاوية النصف قطرية بينما يقاس الزمن t بالدقيقة ، وعندئذ سيكون التسارع الزاوي α مقاسا بالزاوية النصف قطرية في الثانية في الدقيقة ، فإن من المفضل دائما استخدام نفس الوحدات للزمن t .

وإذا كان التسارع الزاوي منتظما ، فإن متوسط السرعة الزاوية يعطى ، كما في حالة الحركة الخطية ، بالعلاقة :

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_f + \omega_0)$$

مثال توضيحي ٧ - ٤ : بدأت عجلة من السكون ثم اكتسبت سرعة دورانية قدرها 240 rev/min في زمن قدره 2.0 min . ماهو متوسط التسارع ؟

طريقة الحل : المعطيات

$$\omega_0 = 0 \quad \omega_f = 240 \text{ rev/s} \quad t = 2.0 \text{ min} = 120 \text{ s}$$

وباستخدام المعادلة (٧ - ٤) ، نجد أن :

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} = \frac{240 - 0}{120} = 2 \text{ rev/s}^2$$

٧ - ٤ معادلات الحركة الزاوية

يتضح مما سبق أن معادلات الحركة الزاوية التي كتبناها حتى الآن تشبه تماما معادلات الحركة الخطية ، باستثناء أن الكميات θ ، ω ، α قد حلت محل s ، v ، a على الترتيب . وحيث أن معادلتى الحركة الخطية الباقيتين قد اشتقتا بالمعالجة الجبرية للمعادلات الثلاث الأولى ، فإن المعادلتين النظيرتين سوف تنطبقان أيضا على الحركة الزاوية . وسنذكر فيمايلي معادلات الحركة الزاوية الخمس مصحوبة بنظيراتها في حالة الحركة الخطية .

معادلات الحركة الخطية	معادلات الحركة الزاوية	معادلات الحركة الزاوية الخمس
(٥ - ٧) $s = \bar{v}t$	$\theta = \bar{\omega}t$	
(٦ - ٧) $v_f = v_0 + at$	$\omega_f = \omega_0 + \alpha t$	
(٧ - ٧) $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_f + v_0)$	$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_f + \omega_0)$	
(٨ - ٧) $2as = v_f^2 - v_0^2$	$2\alpha\theta = \omega_f^2 - \omega_0^2$	
(٩ - ٧) $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$	$\theta = \omega_0t + \frac{1}{2}\alpha t^2$	

يلاحظ أن المعادلات الأربع الأخيرة من (٦ - ٧) إلى (٩ - ٧) لا تنطبق دائما . ومن الضروري أن نتذكر أن المعادلتين (٦ - ٧) و (٧ - ٧) صحيحة فقط في حالة التسارع الثابت . وحيث أن المعادلتين (٨ - ٧) و (٩ - ٧) قد اشتقتا من المعادلتين السابقتين ، فإن المعادلات الثلاث من (٧ - ٧) إلى (٩ - ٧) تقتصر فقط على حالات التسارع المنتظم .

مثال توضيحي ٧ - ٥ : أوقفت مروحة كهربائية عندما كانت تدور بمعدل 3.0 rev/min ثم وصلت إلى السكون بعد زمن قدره 18 s . ماهو تقاصر المروحة بفرض أنه منتظم ؟ وماعدد الدورات التي تدورها المروحة قبل أن تصل إلى السكون (التقاصر ليس ثابتا عمليا) .

طريقة الحل : هذه مسألة نموذجية للحركة الزاوية . نعلم أن :

$$\omega_0 = 3.0 \text{ rev/s} \quad \omega_f = 0 \quad t = 18 \text{ s}$$

$$\alpha = ? \quad \theta = ?$$

من معادلة تعريف التسارع الزاوي α [المعادلة (٦ - ٧)] :

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} = \frac{0 - 3.0 \text{ rev}}{18 \text{ s}^2} = -0.167 \text{ rev/s}^2$$

ولإيجاد θ يمكننا استخدام المعادلة (٩ - ٧) :

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$$

$$= (3.0 \text{ rev/s})(18 \text{ s}) + \frac{1}{2}(-0.167 \text{ rev/s}^2)(18 \text{ s})^2 = 27 \text{ rev}$$

٧ - ٥ الكميات المماسية

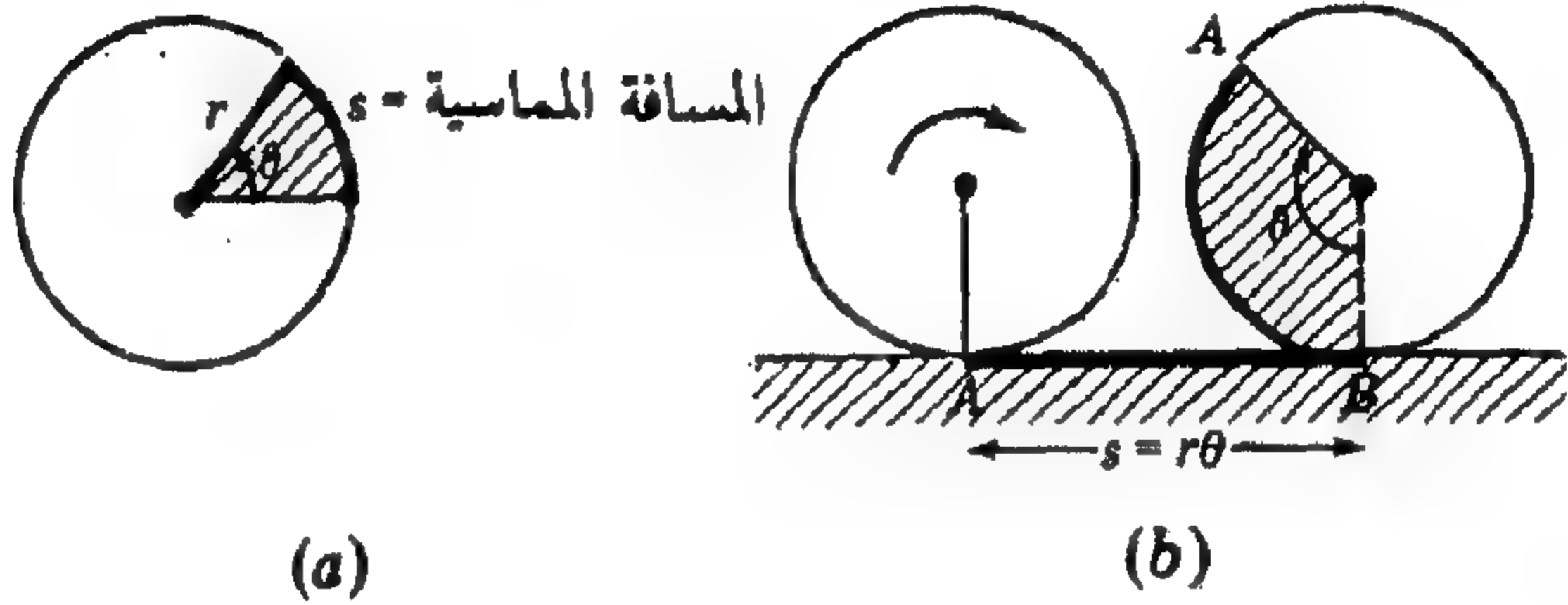
عندما تفك العجلة خيطا أو تتدحرج على الأرض فإنها تتحرك حركتين إحداها دورانية والأخرى خطية . والمطلوب الآن هو إيجاد العلاقة بين هذين النوعين من الحركة . والعلاقة بين المسافتين الخطية والزاوية ، s و θ ، تمثلها المعادلة (١ - ٧) وهي معادلة تعريف المقياس الزاوي . ولتوضيح ذلك لنرجع إلى الشكل ٧ - ٥ .

كما هو واضح من شكل ٧ - ٥ أ ، عندما تدور العجلة زاوية قدرها θ فإن أى نقطة على حافتها ترسم قوسا طوله s . ومن معادلة تعريف المقياس الزاوي نرى أن :

$$s = r\theta$$

بشرط أن تكون θ مقاسة بالزاوية النصف قطرية . وسوف تسمى المسافة s بالمسافة المماسية لأنها تقاس مماسية لحافة العجلة .

وإذا نظرنا الى الشكل ٧ - ٥ ب فإننا سنجد أن العجلة تتدحرج مسافة خطية تعطى بالعلاقة $s = r\theta$. وتمكننا هذه الحقيقة من ربط الحركة الخطية للعجلة المتدحرجة بحركتها الزاوية . وقد رأينا سابقا في الشكلين ٧ - ٣ و ٧ - ٤ أن طولاً مماسياً قدره $s = r\theta$ من الخيط أو السير يلتف على العجلة عندما تدور العجلة زاوية قدرها θ . وفي جميع الحالات المشابهة :



شكل (٧ - ٥)
عندما تدور العجلة زاوية
قدرها θ فإنها تقطع مسافة
قدرها $s = r\theta$.

(٧ - ١٠)

المسافة المماسية = $s = r\theta$

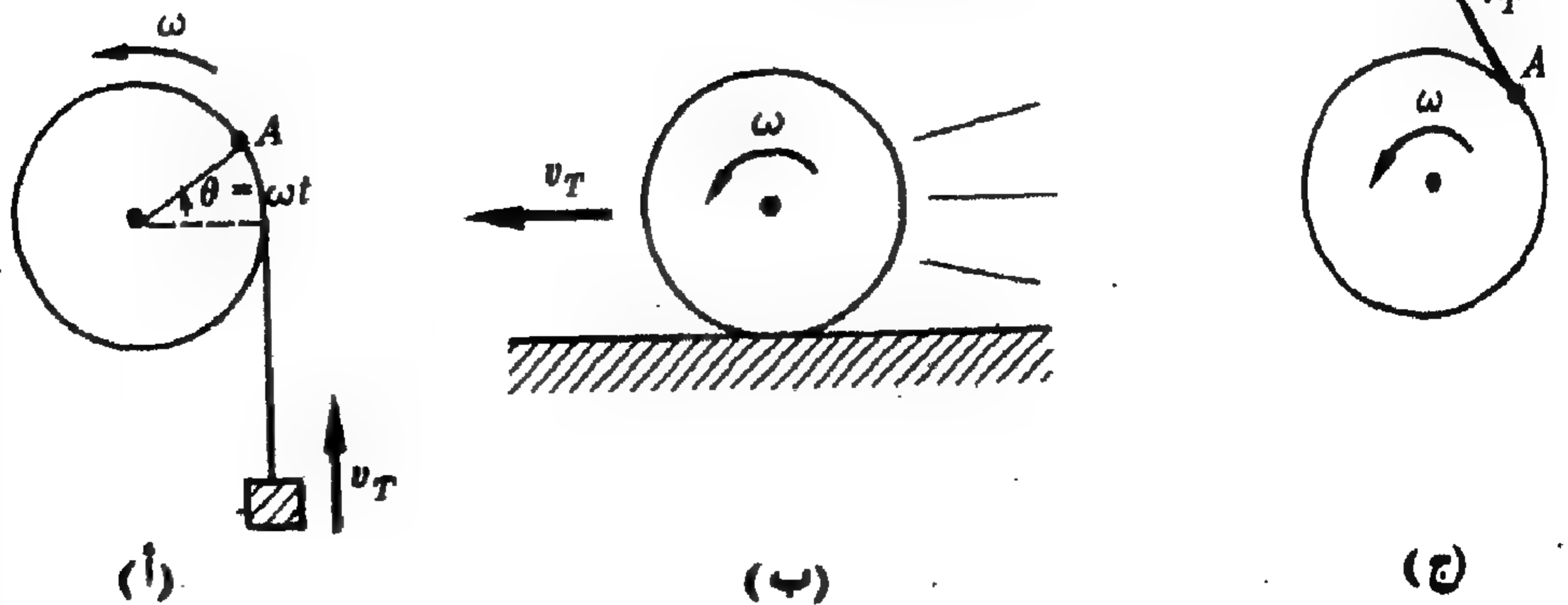
ونؤكد مرة ثانية أن θ يجب أن تكون مقاسة بالزاوية النصف قطرية .

لنفرض أن العجلة تدور بسرعة زاوية ثابتة ω . وعندما تفعل العجلة ذلك تستمر θ في التغير كما هو موضح بالشكل ٧ - ٦ أ . من تعريف ω نجد أن :

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

حيث θ هي الزاوية المقطوعة في زمن t . ولكن θ ترتبط بالمسافة المماسية تبعا للعلاقة $s = r\theta$ ، وعليه فعند التعويض سنحصل على :

$$\omega = \frac{s/r}{t} = \left(\frac{s}{t}\right)\left(\frac{1}{r}\right)$$



شكل (٧ - ٦)
ترتبط السرعة الزاوية ω
بالسرعة المماسية v_T تبعا
للعلاقة $v_T = \omega r$. وفي
هذه العلاقة يجب أن تكون
 ω مقاسة بالزاوية النصف
قطرية في وحدة الزمن .

ولكن s/t ببساطة هي معدل حركة النقطة A على حافة العجلة نتيجة للحركة الدورانية للعجلة . أو ، بطريقة أخرى ، هي معدل الحركة الخطي للنقطة المركزية للعجلة في شكل ٧ - ٦ ب . وسوف نسمى هذه الكمية بمعدل الحركة المماسي v_T . وبالتعويض عن $v_T = s/t$ وإعادة الترتيب نجد أن :

$$v_T = \omega r = \text{معدل الحركة المماسي}$$

وهذه هي أيضا السرعة المماسية للنقطة A في شكل ٧ - ٦ ج .

وإذا كانت السرعة الزاوية ω للعجلة الدائرة متزايدة فإن v_T يجب أن تكون أيضا متزايدة . ويعطى التسارع الزاوي بالعلاقة :

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t}$$

حيث $\omega_f - \omega_0$ هو تغير ω في زمن قدره t . ولكن حيث أن $\omega = v_T/r$ ، يمكننا أن نكتب هذه العلاقة كمايلي :

$$\alpha = \frac{v_{Tf} - v_{T0}}{rt} \quad \text{أو} \quad \frac{v_{Tf} - v_{T0}}{t} = \alpha r$$

ولكن هذه الكمية ببساطة هي معدل تغير السرعة المماسية . وسوف نسميه بالتسارع المماسي a_T . إذن :

العلاقة بين
التسارعين
المماسي والزاوي

$$a_T = \alpha r = \text{التسارع المماسي} \quad (٧ - ١٢)$$

وهي أيضا التسارع الخطي لمركز العجلة المتدحرجة أو الخيط المفكوك .

مثال توضيحي ٧ - ٦ : بدأت سيارة قطر عجلاتها 80 cm الحركة من السكون وتسارعت بانتظام الى سرعة قدرها 20 m/s في 9 s . اوجد التسارع الزاوي والسرعة الزاوية النهائية لإحدى عجلاتها .

طريقة الحل : نعلم أن السرعة الخطية والتسارع الخطي لمركز العجلة يعطيان بالعلاقين المماسيتين (٧ - ١١) و (٧ - ١٢) كالتالي :

$$v_T = \omega r \quad \text{و} \quad a_T = \alpha r$$

ولكن القيمة النهائية للسرعة v_T هي 20 m/s . إذن :

$$\omega_f = \frac{v_{Tf}}{r} = \frac{20 \text{ m/s}}{0.40 \text{ m}} = 50 \text{ rad/s}$$

لاحظ كيف يجب أن ندخل المقياس الزاوي المناسب لأن الوحدات الزاوية ليست موجودة في المعادلات . لماذا استخدمنا الزاوية النصف قطرية في الثانية كوحدة للسرعة وليس الدورة في الثانية ؟

لإيجاد التسارع يجب أن نحل مسألة الحركة الخطية. أولاً نعلم أن :

$$v_0 = 0 \quad v_f = 20 \text{ m/s} \quad t = 9.0 \text{ s} \quad a = ?$$

اذن :

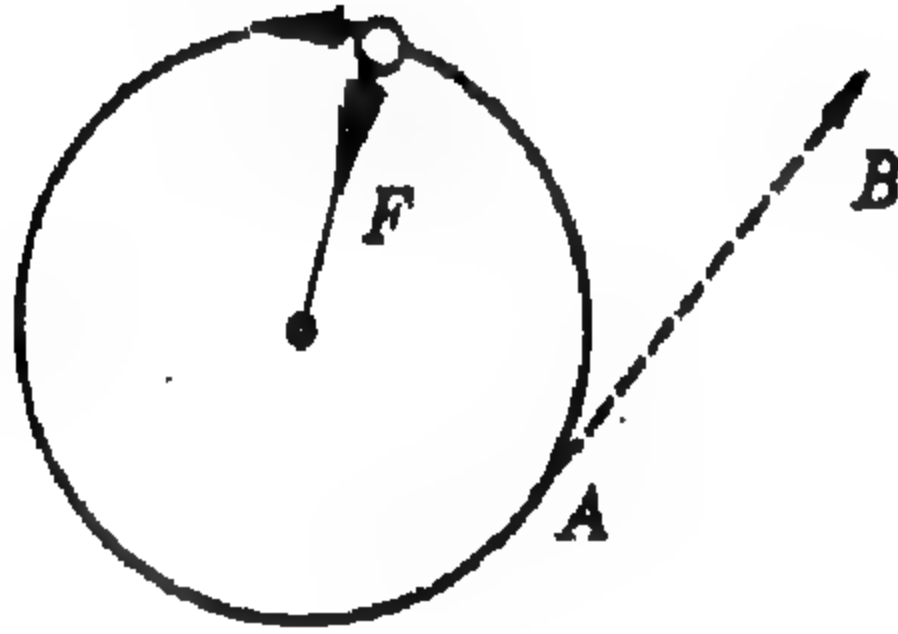
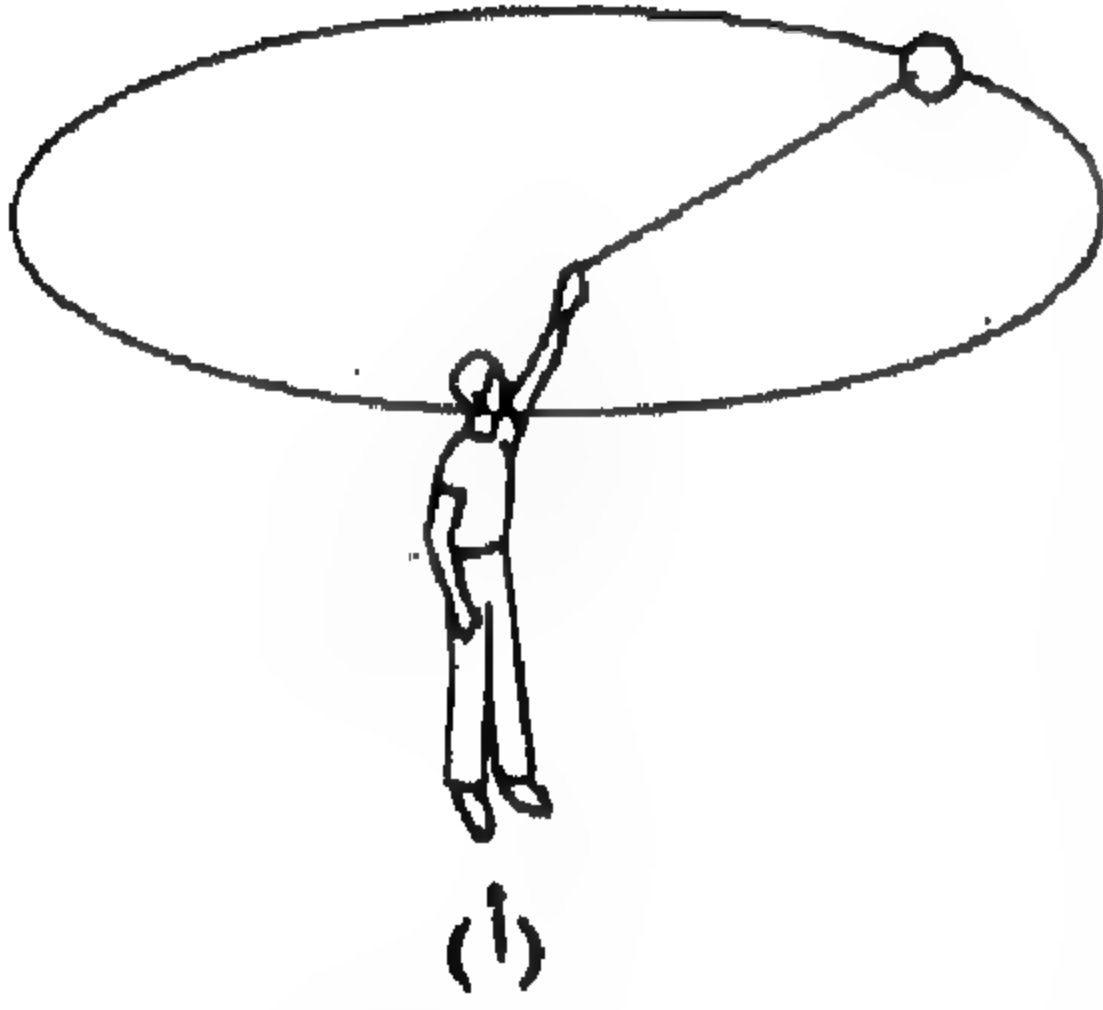
$$a = \frac{v_f - v_0}{t} = \frac{20 - 0}{9.0} \text{ m/s}^2 = 2.22 \text{ m/s}^2$$

وحيث أن هذه القيمة للتسارع a هي بالفعل a_r ، يمكننا أن نكتب العلاقة التالية :

$$\alpha = \frac{a_r}{r} = \frac{2.22 \text{ m/s}^2}{0.40 \text{ m}} = 5.55 \text{ rad/s}^2$$

لاحظ مرة أخرى أننا يجب أن نستخدم الوحدات الزاوية المناسبة (زاوية نصف قطرية ، في نتيجتنا) .

٧ - ٦ الكميات النصف قطرية والقوة الجاذبة المركزية



(ب)

شكل (٧ - ٦)

الشدة F في الخيط هو الذي يحفظ الكرة في المسار الدائري . وإذا قطع الخيط عند وجود الكرة في النقطة A فإنها سوف تستمر في الحركة في خط مستقيم تجاه النقطة B بشرط إهمال الجاذبية .

كان اهتمامنا حتى الآن مقصور على الحركة على محيط الدائرة ولم نقل شيئاً عن القوى التي تسبب حركة الجسم في هذا المسار الدائري . وسوف نرى في هذا الفصل أن القوة النصف قطرية ، أي القوة الموجهة في اتجاه نصف القطر ، ضرورية لكي يتحرك الجسم على محيط الدائرة . وهذه القوة النصف قطرية تكسب الجسم تسارعاً نصف قطرياً . وليس من الطبيعي أن يتحرك الجسم في دائرة ، وقد علم نيوتن ذلك عند صياغته لقوانين الحركة . في الواقع أن نيوتن ذكر أن الجسم يسير في خط مستقيم ما لم يجبر على غير ذلك . ونحن نعلم جميعاً أن الكرة التي تدور في دائرة أفقية في نهاية خيط لن تستمر في مسارها الدائري إذا انقطع الخيط . وسرعان ما تبين المشاهدات الدقيقة أنه إذا ما قطع الخيط عند وجود الكرة في النقطة A في شكل ٧ - ٦ ب فإن الكرة سوف تتبع المسار الخطي المستقيم AB كما أكد نيوتن .

والحقيقة أنه ما لم يجذب الخيط - أو أية آلية أخرى - الكرة في اتجاه مركز الدائرة بقوة قدرها F كما هو مبين في الشكل ٧ - ٦ ب ، فإن الكرة لن تستمر في الحركة في المسار الدائري . وتسمى القوة اللازمة لتحويل المسار المستقيم المعتاد للجسم إلى مسار دائري بالقوة الجاذبة المركزية . لاحظ أن هذه القوة هي الجذب المؤثر على الجسم وأنها موجهة في اتجاه مركز الدائرة ، أي أنها قوة نصف قطرية .

وتبين قوانين الحركة لنيوتن حقيقة أخرى يصعب قبولها في بعض الأحيان . فحيث أن الشيء الوحيد الذي يجذب الكرة في الشكل ٧ - ٦ ب هو الخيط (إهمل الجاذبية الآن) ، فإن القوة الجاذبة المركزية F التي يؤثر بها الخيط على الكرة هي قوة غير متزنة . ومن قانون نيوتن الثاني :

$$F = ma$$

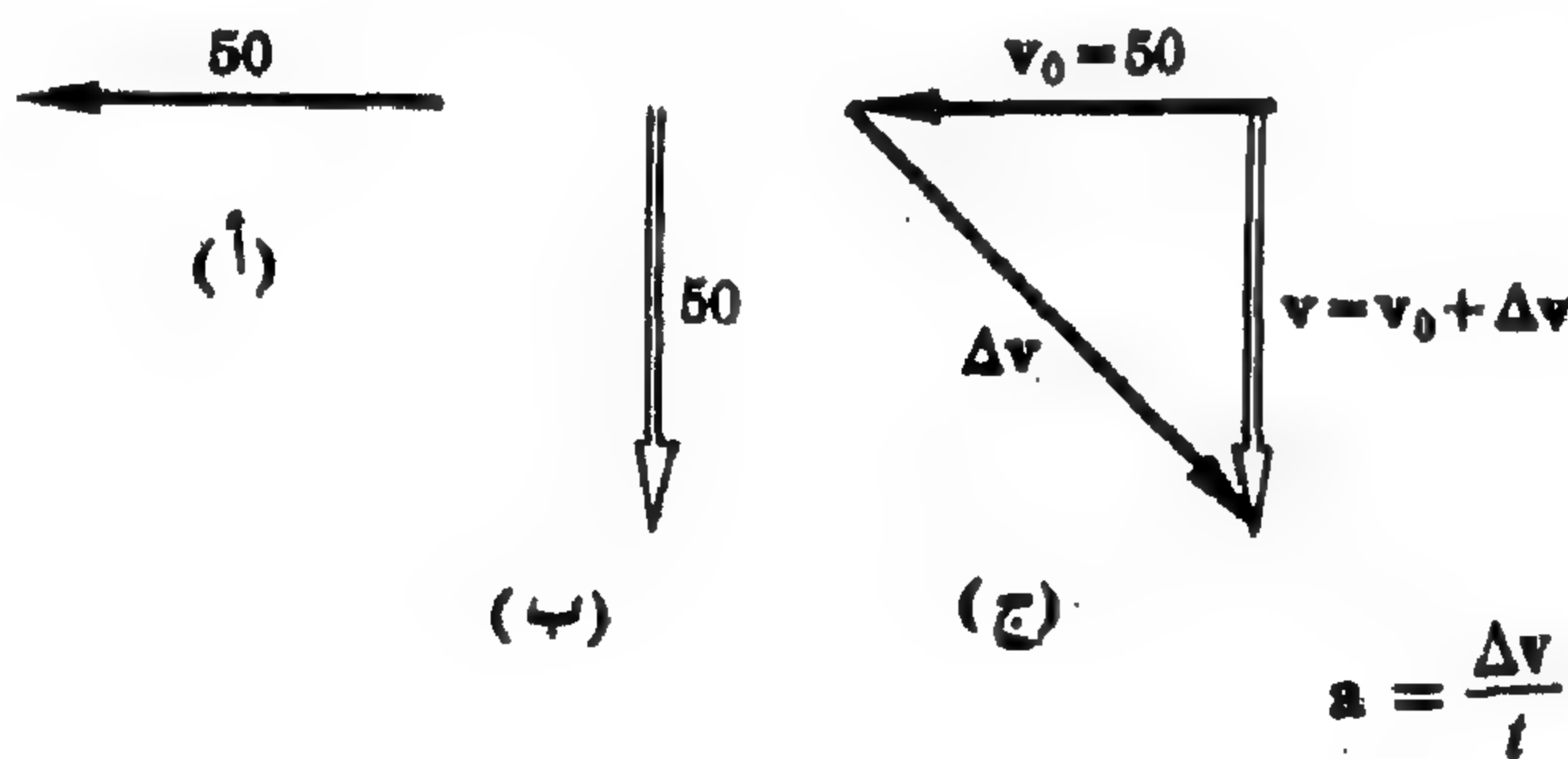
ونحيث أن القوة غير المتزنة F لاتساوى صفرا ، فإن الكرة يجب أن تتسارع وهذا صحيح بالرغم من أن الكرة تسير على الدائرة بسرعة زاوية ثابتة !

وحيث أن F و a متجهان و m كمية غير موجهة فإن التسارع الذى تنبأنا به يجب أن يكون فى نفس اتجاه القوة ، وعليه فإنه يجب أن يكون متجها نحو مركز الدائرة . ومن الواضح أن التسارع الذى تنبأ به قانون نيوتن ليس فى الاتجاه الصحيح ليزيد من سرعة الكرة فى مسارها الدائرى أو ينقصها . ولكى نفهم طبيعة التسارع الذى تسببه القوة الجاذبة المركزية يجب أن نعود إلى المفاهيم الأساسية المتعلقة بذلك . لتأمل تعريفى السرعة والتسارع .

أولاً، عرفنا السرعة كمتجه ، وثانياً ، عرفنا التسارع بأنه معدل تغير هذه السرعة الموجهة . لاحظ أن سرعة الجسم ، المعرفة كمتجه ، يمكن أن تتغير بالرغم من أن القيمة العددية للسرعة وهى مجرد عدد ، يمكن أن تظل ثابتة . وكمثال لذلك ، اعتبر سيارة تتحرك بمعدل قدره 50 km/h نحو الشرق ثم تنعطف لتسير بنفس معدل الحركة 50 km/h ولكن إلى الجنوب . يمكننا تمثيل متجهات السرعة بيانياً كما هو مبين فى الشكل ٧ - ٨ أ ، ب .

من الواضح أن السرعة الموجهة قد تغيرت . لايجاد التغير فى متجه السرعة يجب إيجاد متجه السرعة Δv الذى يلزم إضافته إلى متجه السرعة الأصلى v_0 للحصول على متجه السرعة النهائية v ، وهذا موضح فى الشكل ٧ - ٨ ج .

لاحظ أن معدل حركة الجسم المتحرك فى شكل ٧ - ٨ لم يتغير ولكن السرعة قد تغيرت . أى أن اتجاه الحركة قد تغير . ومن تعريف متوسط التسارع نجد أن :



شكل (٧ - ٨)
لكى تغير السرعة v_0 وقدرها 50 km/h غرباً كما هو مبين فى (أ) إلى السرعة v وقدرها 50 km/h جنوباً كما هو مبين فى (ب) يجب إضافة التغير Δv إلى v_0 كما هو مبين فى (ج) .

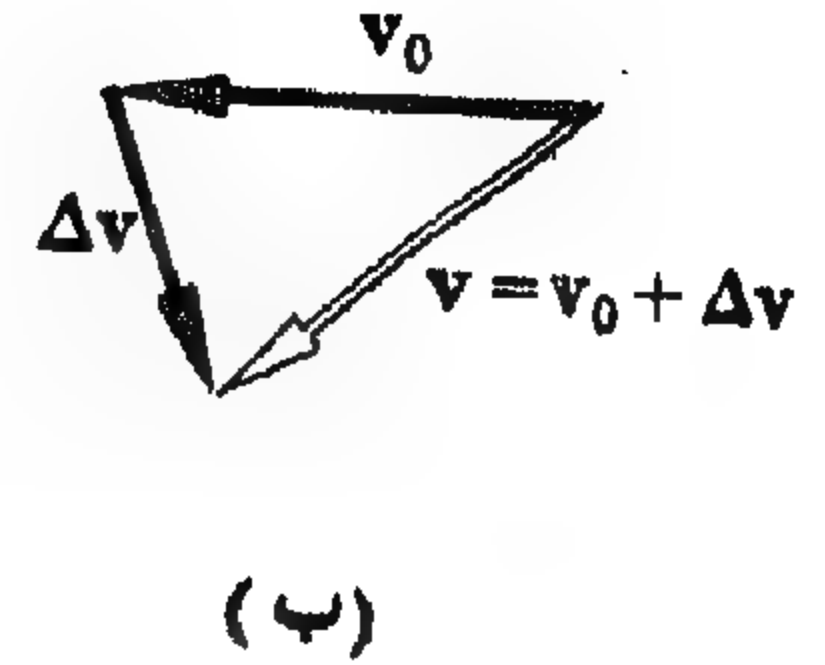
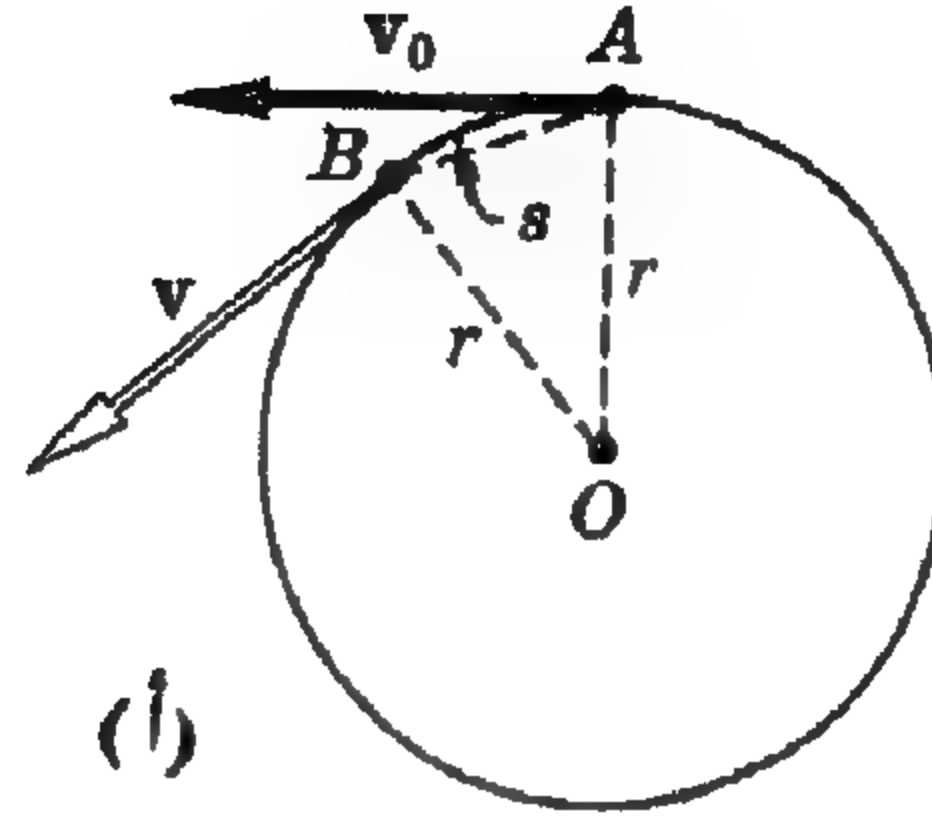
حيث t هو الزمن اللازم للتغير Δv فى السرعة . وهذا هو نوع التسارع الموجود عندما يتحرك الجسم فى دائرة . وبالرغم من أن معدل الحركة أو القيمة العددية للسرعة لايتغير فإن اتجاه الحركة يتغير تحت تأثير القوة الجاذبة المركزية . لنفحص الآن هذه الحالة بتفصيل أكبر لكى نحصل على التعبير الرياضى للقوة اللازمة لحفظ الجسم فى مسار دائرى .

تأمل ما يحدث عندما تتحرك الكرة من A الى B في شكل ٧ - ٩ أ . حيث أن سرعة الكرة قد تغيرت في الاتجاه وليس في المقدار فإن التغير في السرعة هو كما يبينه الشكل ٧ - ٩ ب . وبناء على ذلك فإن تسارع الكرة سيكون :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

شكل (٧ - ٩)

مثلث المتجهات في (ب)
والمثلث OAB في (أ)
متشابهان لأن اضلاع المثلثين
متعامدين كل منها على
الآخر .



حيث Δt هو الزمن الذي تأخذه الكرة لكي تتحرك من A الى B . وفي آخر الأمر نأخذ النهاية عندما تقترب Δt من الصفر ، وفي هذه الحالة ستكون a هي التسارع اللحظي .

وحيث أن معدل حركة الكرة هو v والمسافة التي قطعها هي s كما هو مبين في الشكل ٧ - ٩ أ فإن الزمن المنصرم هو :

$$\Delta t = \frac{s}{v}$$

ومنه نجد بعد التعويض عن a في المعادلة أن :

$$a = \frac{v \Delta v}{s}$$

لنقارن الآن المثلث OAB بالمثلث المبين في الجزء ب من شكل ٧ - ٩ . من الواضح أن OA عمودي v_0 وأن OB عمودي على v ، BA عمودي على Δv وعلى ذلك فإن المثلثين متشابهان ويمكننا إذن أن نكتب العلاقة التالية :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\overline{BA}}{r}$$

ولكن اذا كانت النقطة A قريبة من B على الدائرة ، وهذا يحدث عندما $\Delta t \rightarrow 0$ فإن طول القوس من B الى A سيكون مساويا تقريبا لطول الخط \overline{BA} . في حدود هذا التقريب يمكننا أن نعتبر أن $\overline{BA} = s$ ، وعليه فإن العلاقة السابقة تصبح :

$$\Delta v = \frac{sv}{r}$$

في النهاية عندما $\Delta t \rightarrow 0$.

وبالتعويض عن قيمة v في معادلة التسارع a نحصل على :

(١٣ - ٧)

$$a = \frac{v^2}{r}$$

حيث a تمثل الآن التسارع اللحظي لأنها أوجدت عند النهاية عندما $\Delta t \rightarrow 0$.
ويسمى هذا التسارع الذى تسببه القوة الجاذبة المركزية بتسارع أو عجلة الجذب المركزى . وفى النهاية فإن القوة الجاذبة المركزية تعطى بالعلاقة $F = ma$ ،
لذلك فإن :

(١٤ - ٧)

$$F_{\text{centripetal}} = \frac{mv^2}{r}$$

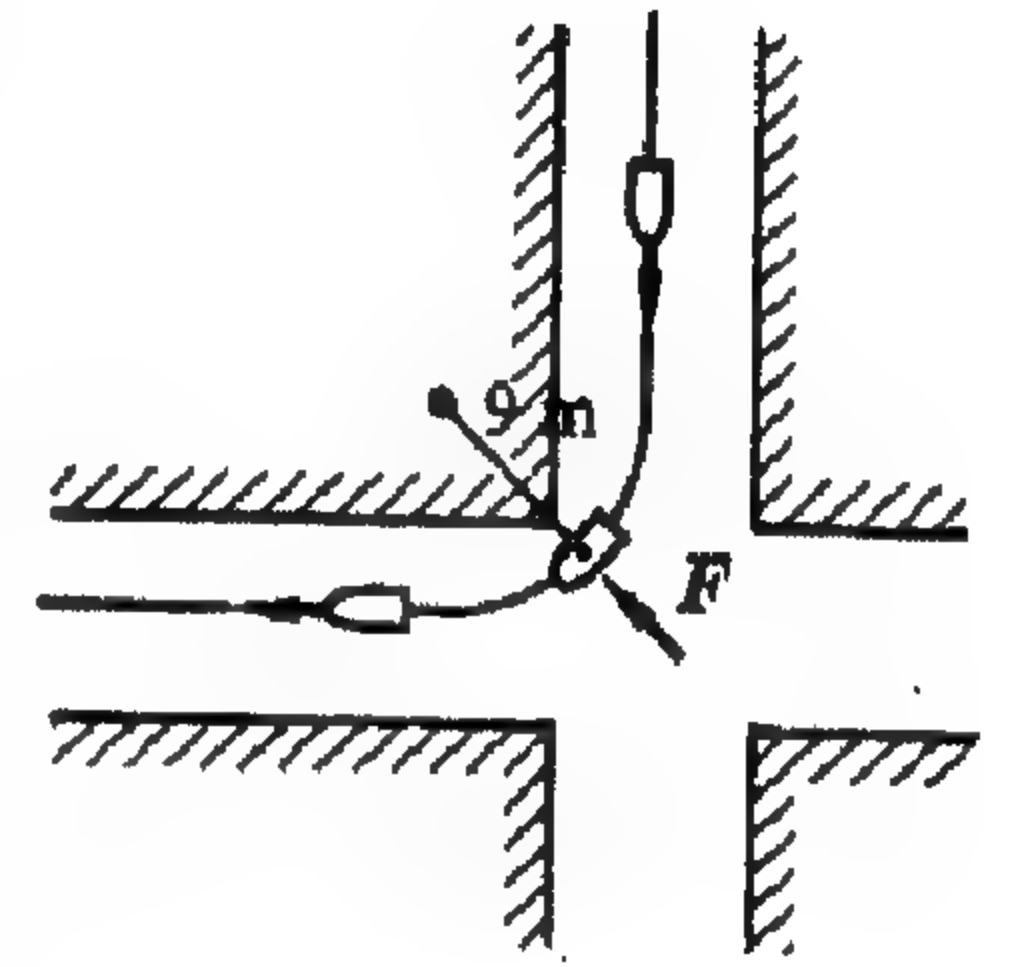
القوة الجاذبة
المركزية

بالإضافة الى ذلك فإن اتجاه a ، وكذلك اتجاه $F_{\text{centripetal}}$ هو نفس اتجاه Δv . ولكننا نرى من الشكل ٧ - ٩ أن Δv عمودية على المنصف العمودى للزاوية بين v و v_0 ، وعليه فإنها موجهة فى اتجاه نصف قطر الدائرة عند منتصف القوس بين A و B فى الشكل ٧ - ٩ أ . وعندما $\Delta t \rightarrow 0$ فإن القوس بين A و B يقترب أيضا من الصفر . يستنتج من ذلك إذن أن التسارع اللحظى لجسم يتحرك بمعدل حركة منتظم فى دائرة يتجه الى الداخل نحو مركز الدائرة . وهذا هو السبب فى تسميته بالتسارع النصف قطرى ، واتجاه القوة الجاذبة المركزية هو أيضا نفس الاتجاه .

تبين لنا المعادلة (٧ - ١٤) أن القوة اللازمة لحفظ جسم فى مسار دائرى تتناسب مع مربع سرعة الجسم مضروبا فى كتلته . ولذلك فكلما زادت كتلة الجسم كلما أسرع فى دورانه ، وكلما زاد أيضا الشد فى الجبل الذى يقيد حركته فى دائرة . وهذه خبرة عامة للكثير منا . ويمكن بسهولة اثبات حقيقة أن القوة الجاذبة المركزية تزداد كلما نقص نصف قطر الدائرة بإدارة قطعة من الطباشير مربوطة فى خيط فى دائرة . تذكر مع ذلك عند اجراء هذه التجربة أنه اذا كانت v ثابتة فى المقدار فسيلزم لقطعة الطباشير زمن أقل لكى تقطع دائرة صغيرة مما يلزمها لقطع دائرة كبيرة . وعليه فإن معدل الحركة الزاوية للجسم سيكون أكبر فى حالة الدائرة الصغيرة حتى اذا كان معدل الحركة الخطى للجسم ثابتا .

مثال توضيحي ٧ - ٧ : تنعطف سيارة كتلتها 1200 kg عند ملتقى شارعين بمعدل قدره 8.0 m/s متحركة على قوس دائرة فى هذه العملية . إذا كان نصف قطر الدائرة التى يمثل القوس جزءا منها هو 9.0 m فما هى القوة الأفقية التى يجب أن يؤثر بها الطريق على الاطارات بحيث تحفظ السيارة فى هذا المسار ؟ (انظر شكل ٧ - ١٠) .

طريقة الحل : القوة اللازمة هى القوة الجاذبة المركزية .

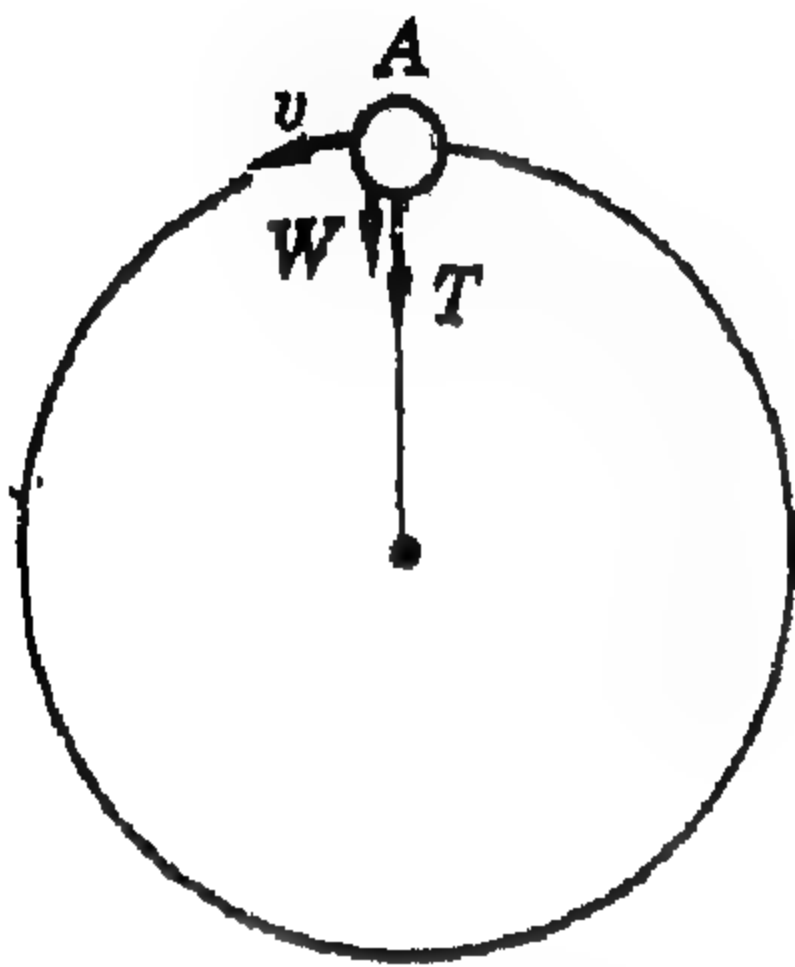


شكل (٧ - ١٠)

لكى تتمكن السيارة من الانعطاف حول ملتقى الشارعين كما هو مبين لابد أن توفر قوة الاحتكاك F بين الاطارات والطريق القوة الجاذبة المركبة اللازمة لحفظ السيارة فى مسار دائرى .

$$F = m \frac{v^2}{r} = (1200 \text{ kg}) \left(\frac{64 \text{ m}^2/\text{s}^2}{9.0 \text{ m}} \right) = 8530 \text{ N}$$

ويجب أن تنشأ هذه القوة نتيجة لقوة الاحتكاك بين أرضية الطريق والعجلات . هل يمكنك أن تثبت أن معامل الاحتكاك يجب أن يكون 0.73 على الأقل لكي تتوفر هذه القوة الكبيرة ؟ وإذا كان الطريق مبتلا بحيث يصبح الاحتكاك بين الاطارات والطريق صغيرا ، فإن قوة الاحتكاك المؤثرة على الاطارات قد لاتصل الى هذه القيمة . وفي هذه الحالة سوف ترحف السيارة جانبا خارجة عن المسار الدائري (في خط مستقيم تقريبا) وقد لاتستطيع الانعطاف في منحنى .



شكل (٧ - ١١)
عندما تكون الكرة في الوضع
المبين فإن وزنها ينتج جزوا من
القوة الجاذبة المركزية
الضرورية .

مثال توضيحي ٧ - ٨ : تتأرجح كرة مربوطة في نهاية خيط في دائرة رأسية نصف قطرها r تحت تأثير الجاذبية كما هو مبين في شكل ٧ - ١١ . ماقيمة الشد في الخيط عندما تكون الكرة عند النقطة A على المسار كما هو مبين في الشكل ٧ - ١١ إذا كان معدل حركة الكرة عند هذه النقطة هو v ؟

طريقة الحل : لكي تتحرك الكرة في دائرة لابد أن تكون محصلة القوى المؤثرة عليها نحو مركز الدائرة . وفي هذه الحالة تؤثر على الكرة عند وجودها عند النقطة A قوتان هما جذب الخيط T وجذب الأرض (أو وزن الجسم) ، ومحصلة هاتين القوتين يجب أن تكون متجهة نحو مركز الدائرة . وهذه القوة المحصلة هي التي تقدم القوة الجاذبة المركزية اللازمة لاستمرار الكرة في الحركة في المسار الدائري . يمكننا إذن أن نكتب القوة المحصلة المؤثرة على الكرة عند النقطة A وهي $(T + W)$ مساوية للقوة الجاذبة المركزية المطلوبة وهي (mv^2/r) :

$$T + W = \frac{mv^2}{r}$$

بناء على ذلك فإن الشد في الخيط هو :

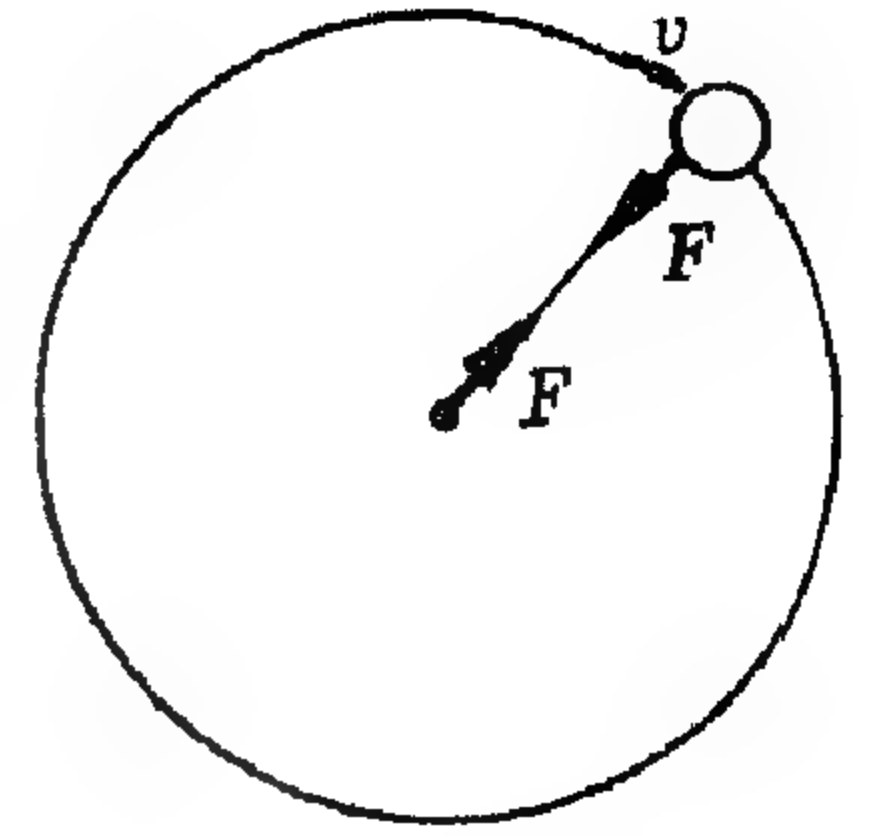
$$T = \frac{mv^2}{r} - W = m \left(\frac{v^2}{r} - g \right)$$

لاحظ أنه إذا كانت $v^2/r = g$ فإن الشد في الخيط سيكون صفرا ، وعليه فإن القوة الجاذبة المركزية ستساوى تماما الوزن . وهذه هي الحالة التي تحفظ الكرة في المسار الدائري . وإذا كان معدل حركة الكرة v أقل من القيمة المعطاة بهذه العلاقة ، أي إذا كان $v < \sqrt{rg}$ فإن القوة الجاذبة ستكون أقل من وزن الكرة . وفي هذه الحالة ستسقط الكرة الى أسفل تاركة المسار الدائري .

٧ - ٧ القوة الطاردة المركزية

يخبرنا قانون الفعل ورد الفعل لنيوتن أن لكل قوة مؤثرة على جسم ما هناك قوة مساوية لها في المقدار ومضادة في الاتجاه تؤثر على جسم أو أجسام أخرى . وعليه

فإذا كانت القوة الجاذبة المركزية تؤثر على جسم ما لكي تحفظه في مسار دائري ، فلا بد من وجود جسم آخر يقع تحت تأثير قوة مساوية في المقدار للقوة الجاذبة المركزية ومضادة لها في الاتجاه وتسمى هذه القوة الثانية (المؤثرة على جسم ثان وليس على نفس الجسم الذي يتحرك في دائرة ، بالقوة الطاردة المركزية .



شكل (٧ - ١٢)

تؤثر القوة الجاذبة المركزية على الكرة وتجذبها نحو مركز الدائرة . أما القوة الطاردة المركزية المساوية في المقدار والمعاكسة في الاتجاه فإنها تؤثر على يد الشخص الذي يمسك الحيط عند مركز الدائرة وتجذبها الى الخارج من مركز الدائرة كما هو مبين .

٧ - ٨ اعتقاد خاطيء شائع

من المحتمل أن يسارع الناس الى استنتاجات خاطئة تماما عند تفسير تجاربهم فمثلا ، قد يظن شخص جالس في وسط مقعد سيارة أنه تعرض لدفع الى جانب السيارة عند انعطافها حول ملتقى طريقين متعامدين. وقد يؤكد هذا الشخص أن القوة التي دفعته جانبا كانت كبيرة لدرجة أنها قذفته الى جانب السيارة بشدة تكفى لإصابته . وهذا بالطبع محض هراء . فلا وجود لشبح خفى يدفعه تجاه جانب السيارة . وبالتأكيد ليس هناك أى جسم مادي يمكن أن يقوم بدفعه في هذا الاتجاه . لابد إذن أن يكون هذا الشخص مخطئا .

ولكن نفس الشخص لن يدعى أن قوة خفية قد أثرت عليه عند توقف السيارة فجأة دافعه اياه بشدة على لوحة اجهزة قياس السيارة فهو يعلم أن كمية تحركه يمكن أن تفقد فقط ما إذا أعاق حركته قوة ما . لذلك فعندما تقف السيارة فجأة فإنه يستمر في الحركة الى الأمام حتى تبدأ لوحة أجهزة قياس السيارة في التأثير عليه بقوة لايقافه عن الحركة الى الامام . وهذا ليس إلا مثال لفكرة نيوتن من أن الاشياء تستمر في الحركة الى أن تؤثر عليها قوة تسبب ايقافها .

وبالمثل في حالة السيارة التي تنعطف حول ملتقى الطريقين ، فهنا يدفع الاحتكاك بين الطريق والاطارات أفقيا ويغير من حركتها في خط مستقيم . ويكون الوضع سيئا للغاية بالنسبة الى شخص يجلس في منتصف مقعد حيث لاوجود للاحتكاك تقريبا ، لأن قوة الاحتكاك بين المقعد وبنطلون الشخص الجالس أصغر من أن تستطيع تغيير حركته في خط مستقيم . لذلك فإنه سوف يتزحلق في خط مستقيم الى أن يصطدم بجانب السيارة الذي يؤثر عليه عندئذ بقوة تسبب تحركه في نفس المسار الذي تتبعه السيارة .

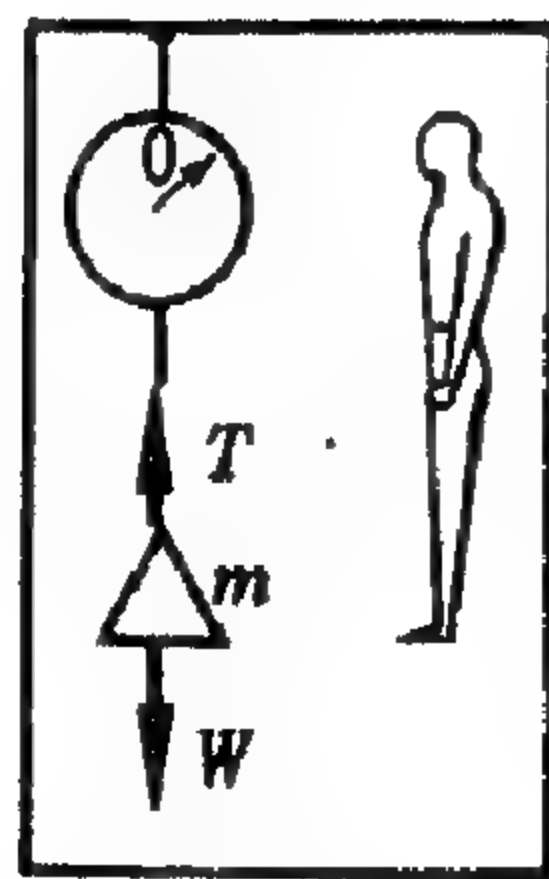
٧ - ٩ انعدام الوزن

تسمع كثيرا أن الاجسام تبدو عديمة الوزن في سفينة فضاء تدور حول الأرض أو في طريقها الى نقطة بعيدة في الفضاء . لنفحص هذه الظاهرة ببعض التفصيل . أولاً يجب علينا أن نذكر تعريف الوزن مرة ثانية . يعرف الوزن بأنه شد الجاذبية الأرضية للجسم المعنى . ووزن الجسم على الأرض هو قوة الجاذبية الأرضية المؤثرة على الجسم . بالمثل فإن وزن الجسم على القمر هو قوة جاذبية القمر المؤثرة على الجسم .

ومن المعتاد قياس وزن جسم ما بوضعه على كفة ميزان . وإذا أريد معرفة الوزن بالتقريب يمكنك ملاحظة القوة التي يؤثر بها الجسم على يدك في حالة السكون . وعادة تكون القوة التي يقرأها الميزان ، أى القوة التي يؤثر بها الجسم على كفة الميزان ، وكذلك القوة التي تؤثر على يد تحمل الجسم مساوية لقوة شد الجاذبية الأرضية للجسم ، أى وزن الجسم . ومع ذلك فإن هذا ليس صحيحا دائما كما سوف نرى ، وعليه فإننا سوف نستخدم اصطلاح الوزن الظاهري للدلالة على قراءة الميزان أو القوة التي تؤثر على اليد بالإضافة الى غير ذلك من الطرق غير الاساسية الشائعة لتقدير وزن الجسم .

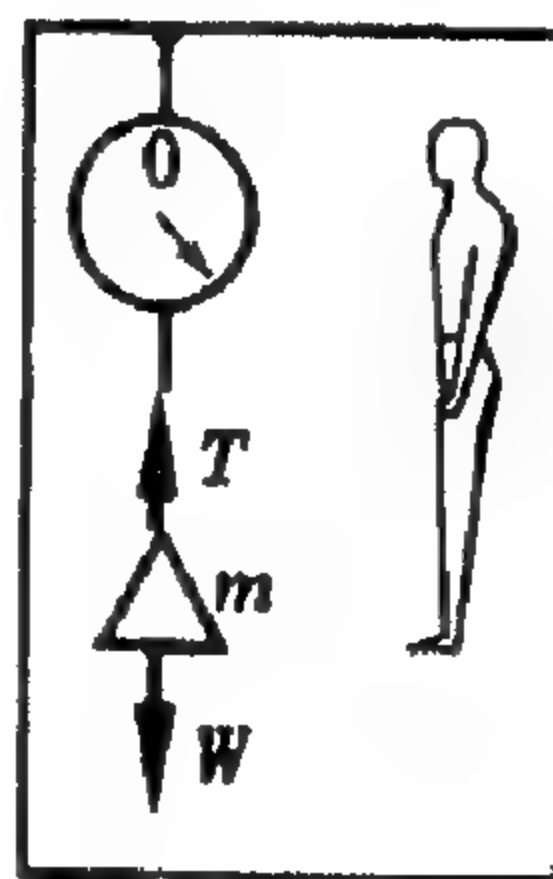
لتوضيح هذه النقطة سندرس الوزن الظاهري لجسم كتلته m في مصعد . وقد سبق أن ناقش هذا الموضوع في الفصل الثالث ، ولكننا سوف ندرسه مرة أخرى هنا . اذا كان المصعد - المبين في الشكل ٧ - ١٣ أ ساكنا فإن قانون نيوتن الثاني يخبرنا أن القوة المحصلة المؤثرة على الجسم تساوى صفرا لأن التسارع يساوى صفرا . واذا كانت قوة الجذب المؤثرة على الجسم (وزنه) هي W والشد في الحيط الذي يحمل الجسم هو T فإن :

$$T = W \quad \text{أو} \quad T - W = 0$$



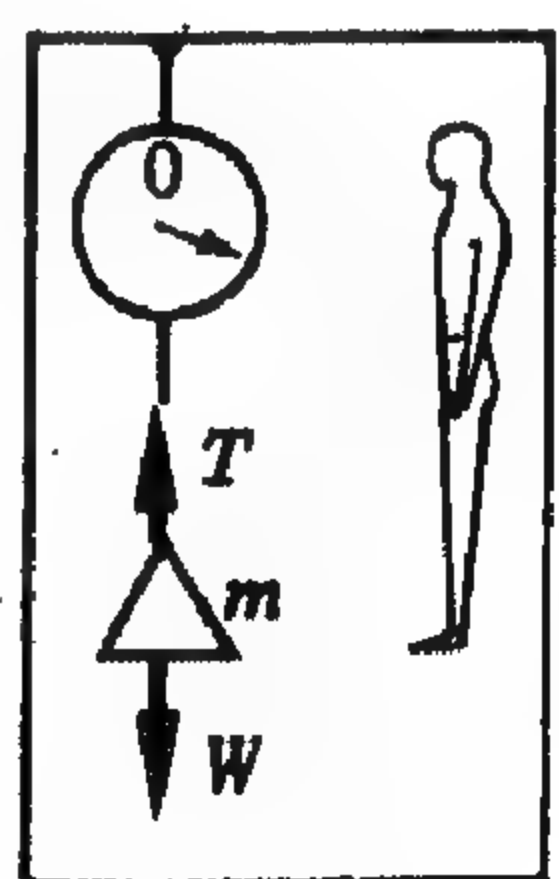
ا الى أسفل
 $W - T = ma$
 or $T = W - ma$

(ج)



ا الى أعلى
 $T - W = ma$
 or $T = ma + W$

(ب)



$a = 0$
 $T = W$

(ا)

شكل (٧ - ١٣)
 يظهر وزن الجسم الموجود في
 مصعد مختلفا بالنسبة
 لشخص موجود في نفس
 المصعد ، ويعتمد ذلك على
 حركة المصعد .

عندما يكون $a = 0$. وفي هذه الحالة يكون الشد في الخيط ، هو W ، كذلك فإن الوزن الظاهري للجسم أى قراءة الميزان ، يساوى وزنه الحقيقى W .

ويسود نفس هذا الموقف طالما كان $a = 0$. تحت هذا الشرط يكون $T = W$ ، ويكون الوزن الظاهري مساويا للوزن الحقيقى . وحتى اذا كان المصعد متحركا الى أعلى أو الى أسفل بسرعة ثابتة فإن التسارع سيظل صفرا ويكون الوزن الظاهري مساويا للوزن الحقيقى .

لنفحص الآن الموقف المبين فى الشكل ٧ - ١٣ ج ، حيث تسارع المصعد الى أسفل فى هذه الحالة . بتطبيق قانون نيوتن الثانى كما سبق نجد أن:

$$W - T = ma$$

ومنه

$$T = W - ma$$

لاحظ أن الشد فى الخيط (وبالتالى قراءة الميزان) أصغر من W بمقدار ma . عندئذ سيبدو وزن الجسم أقل من W بالنسبة لمشاهد موجود فى المصعد المتسارع . الوزن الظاهري للجسم فى هذه الحالة هو $W - ma$.

ويحدث أكثر المواقف إثارة عندما يسقط المصعد سقوطا ذاتيا ، أى عندما يتساوى تسارع المصعد مع تسارع الجاذبية ، $a = g$. وحيث أن $W = mg$ ، $a = g$ فى حالة السقوط الذاتى ، فإن الشد فى الخيط :

$$T = W - ma$$

يصبح

$$T = mg - mg = 0$$

أى أن الجسم يبدو عديم الوزن فى المصعد الذى يسقط سقوطا ذاتيا ! وإذا فكرنا فى ذلك قليلا فسيتضح أن هذا ليس بغريب فحيث أن المصعد (وكل شئ بداخله) يتسارع بنفس تسارع الجاذبية ، فمن تعريف مانقصده بالسقوط الذاتى ينتج أن من المستحيل وجود أى قوة تحمل الأجسام (المصعد وكل شئ بداخله) أو تعوق السقوط الذاتى بأى شكل من الأشكال . وعليه فإن جميع القوى الحاملة المؤثرة على المصعد وكل شئ بداخله لابد أن تساوى صفرا . لهذا فإن الشد فى الحبل الذى يحمل الجسم لابد أن يكون صفرا ، ونتيجة لذلك تبدو جميع الاجسام الموجودة داخل المصعد عديمة الوزن .

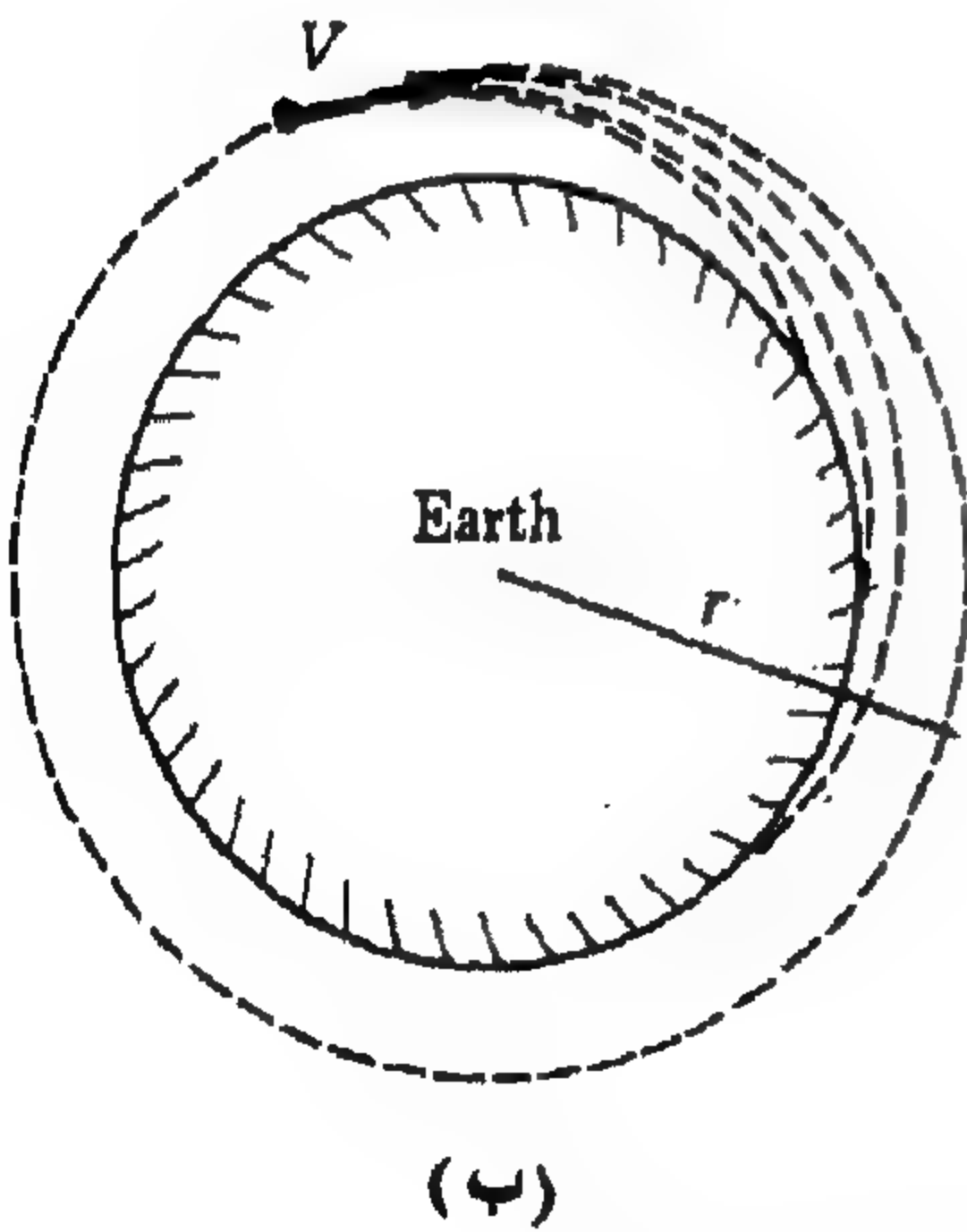
نرى من هذه الاعتبارات أن الوزن الظاهري للأجسام فى الأنظمة المتسارعة ليس بالضرورة مساويا للوزن الحقيقى . وعلى وجه الخصوص فاذا

كان النظام يسقط سقوطا ذاتيا* فإن جميع القوى الحاملة يجب أن تكون صفرا وفي هذه الحالة تبدو جميع الاجسام عديمة الوزن . وهذا يعنى أنه طالما كانت سفينة الفضاء تسقط سقوطا ذاتيا في الفضاء ، أى عندما لاتعمل المحركات الصاروخية ، فإن أى شىء بداخل هذا النظام الساقط سقوطا ذاتيا سيبدو عديم الوزن . ولا يعتمد ذلك على مكان وجود الجسم أو على ما اذا كان ساقطا تحت تأثير قوة جذب الأرض أو الشمس أو أى نجم بعيد ، فطالما كانت السفينة ساقطة سقوطا ذاتيا فإن كل شىء بداخلها سيبدو عديم الوزن .

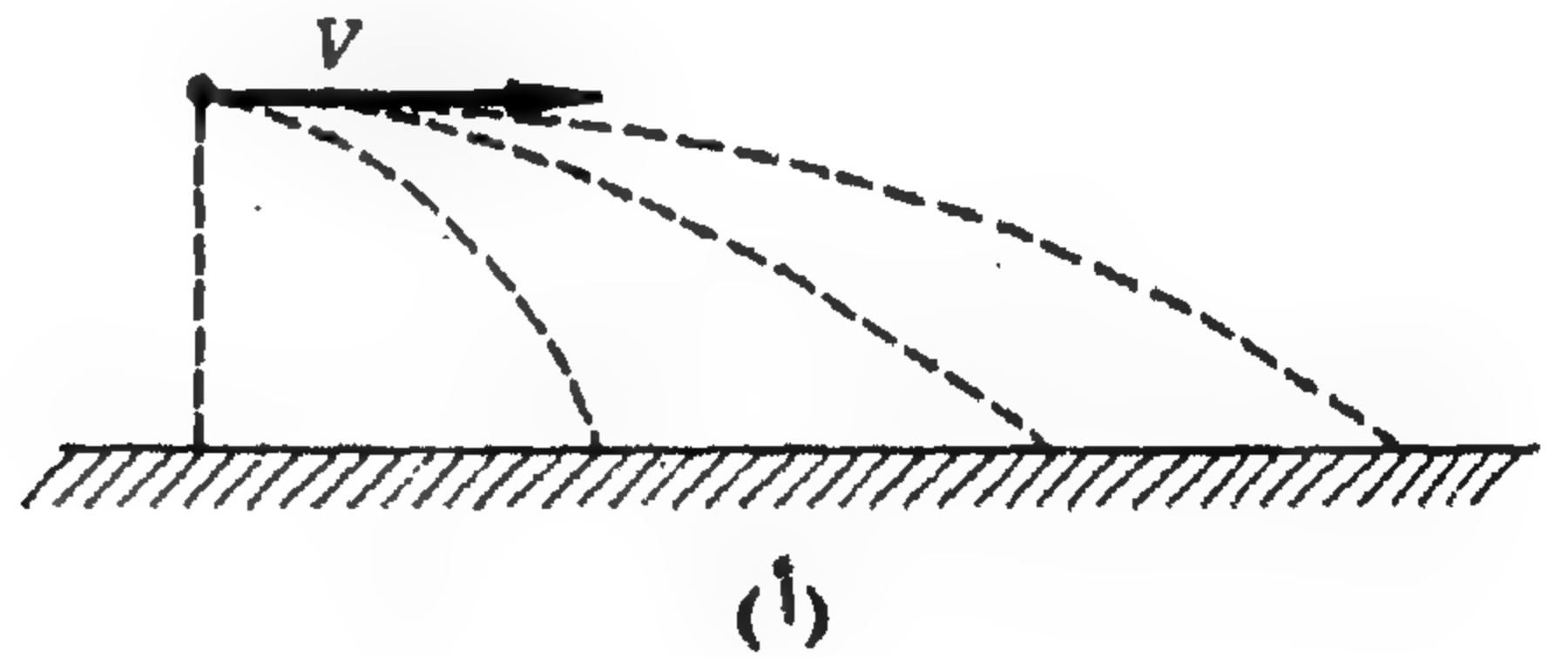
والتابع الأرضى أو القمرى هو ببساطة مثال لسفينة تسقط ذاتيا . وقد تدهشك هذه العبارة في البداية ، ولكن من السهل اثبات صحتها . لتأمل سلوك مقذوف اطلق في اتجاه مواز لسطح الأرض في غياب الاحتكاك الهوائى ، (عند ارتفاعات الاقمار الصناعية يكون الهواء رقيقا جدا بحيث يمكن اهماله) ، كما هو مبين في شكل ٧ - ١٤ . في الجزء أ يطلق المقذوف بسرعات متزايدة تدريجيا ، ويلاحظ من الشكل أن انحناء مسار المقذوف أثناء السقوط الذاتى يقل مع زيادة السرعة الأفقية . وإذا أطلق الجسم بسرعة كافية في اتجاه مواز للأرض فإن انحناء مساره سيتطابق مع انحناء الأرض ، وهذا مبين في الجزء ب . وفي هذه الحالة سوف يدور الجسم (سفينة الفضاء مثلا) ببساطة حول الأرض . وبالتقرب من سطح الأرض ، أى على ارتفاع بضعة مئات الأميال من سطح الأرض ، تصل هذه السرعة الحرجة الى حوالى $29,000 \text{ km/h}$ ، وهذه هي سرعة دوران قمر صناعى أرضى . وفي هذه الحالة يتسارع القمر الصناعى طوال الوقت نحو مركز الأرض لأنه يدور حول الأرض . والتسارع النصف قطرى للتابع الأرضى هو ببساطة تسارع الجاذبية g . وفي الحقيقة

شكل (٧ - ١٤)

إذا اطلق جسم بسرعة كافية في اتجاه مواز لسطح الأرض فإنه سوف يدور حولها (وربما كان نيوتن أول من أدرك هذه الحقيقة) .



(ب)



(أ)

* تذكر أن الجسم الذى يسقط سقوطا ذاتيا هو ذلك الجسم الذى يقع تحت تأثير نوع واحد من القوى الخارجية غير المتزنة ، وهو الجذب الناقل للأرض أو الأجسام المشابهة .

فإن القمر الصناعي يسقط باستمرار تجاه مركز الأرض ، ولكن انحناء الأرض يمنعه من التصادم بها . وحيث أن القمر الصناعي هذا في حالة سقوط ذاتي ، فإن جميع الاجسام بداخله تبدو عديمة الوزن .

وفي الحقيقة فإن المعادلات التي تحكم هذه الحركة بسيطة جدا . فلكي تتبع سفينة الفضاء مساراً دائرياً لابد أن تجذبها القوة الجاذبة المركزية تجاه مركز الدائرة . وتنشأ هذه القوة نتيجة للجذب الثقالي للأرض المؤثر على السفينة ، وبالتحديد :

$$F_G = G \frac{mM_{\text{earth}}}{r^2}$$

حيث m هي كتلة سفينة الفضاء ، M_{earth} كتلة الأرض ، r نصف قطر المدار . وبمساواة هذه القوة بالقوة الطاردة المركزية mv^2/r نجد أن :

$$G \frac{mM_{\text{earth}}}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

ومنه :

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\text{earth}}}{r}} \quad (٧ - ١٥)$$

ونرى من ذلك أن كتلة السفينة تشطب من الطرفين ، لذلك - كما وضعنا سابقاً ، فإن السرعة التي تقذف بها السفينة ، أى سرعة دخولها في المدار ، لا تعتمد على نوع المقذوف . وبالرغم من ذلك فإن السرعة اللازمة تقل بزيادة نصف قطر المدار كما تبين المعادلة السابقة .

ملخص :

تقاس الزوايا بالدرجة والدورة والزوايا النصف قطرية $2\pi \text{ rad} = 360^\circ = 1 \text{ rev}$. تمثل الزوايا بالرمز θ . يسمى معدل تغير θ بالنسبة للزمن بالسرعة الزاوية ω . التسارع الزاوي α هو معدل تغير ω بالنسبة للزمن .

كما في الحركة الخطية ، هناك خمس معادلات للحركة الزاوية تطبق في حالة ثبوت α هذه المعادلات هي :

$$\theta = \bar{\omega}t \quad \alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} \quad \bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_0 + \omega_f)$$

$$\omega_f^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta \quad \theta = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$$

المعادلة الأولى تعرف متوسط السرعة الزاوية والمعادلة الثانية تعرف متوسط التسارع الزاوي .

عندما تدور عجلة حول محورها فإن أى نقطة على محيطها يمكن أن توصف بدلالة الكميات المماسية . المسافة المماسية التي تتحركها نقطة معينة على المحور s عندما تدور العجلة زاوية قدرها θ تعطى بالعلاقة $s = r\theta$ حيث r نصف قطر العجلة . بالمثل ، تعطى السرعة المماسية والتسارع المماسي لهذه النقطة بالعلاقين .

$$v_T = r\omega \quad a_T = r\alpha$$

في جميع المعادلات التي تربط الكميات الزاوية بالكميات المماسية يجب استخدام الزاوية النصف قطرية لقياس الزاوية .

عندما تلف عجلة دائرة حول محورها خيطا على حافتها تعطى ازاحة وسرعة وتسارع أى نقطة على الخيط بالكميات المماسية s ، v_T ، a_T . بالمثل ، عندما تندرج عجلة على سطح مستو بدون انزلاق ، تعطى ازاحة وسرعة وتسارع مركز العجلة بالكميات المماسية s ، v_T ، a_T .

لكي يتحرك الجسم في مسار دائري لأبد من وجود القوة الجاذبة المركزية ، وهي القوة اللازمة لجذب الجسم من حركته المعتادة في خط مستقيم . وتتغير السرعة الموجهة للجسم باستمرار عند حركته في مسار دائري . يقع الجسم تحت تأثير تسارع نصف قطري موجه نحو مركز الدائرة . ويعطى هذا التسارع بالمقدار v^2/r . أما القوة الجاذبة المركزية التي تسبب هذا التسارع فتعطى بالمقدار mv^2/r .

القوة اللازمة لحمل الجسم لاتساوى دائما وزنه . وتسمى القوة اللازمة لحمل الجسم بوزنه الظاهري . اذا كان الجسم وحامله متسارعين فإن الوزن والوزن الظاهري يختلفان عادة . في الحالة الخاصة بالسقوط الحر يساوى الوزن الظاهري صفرا . نتيجة لذلك تبدو الأجسام عديمة الوزن عندما تسبح في الفضاء . بالمثل ، حيث أن التابع الأرضي يسقط سقوطا حرا فإن الأجسام الموجودة بداخله تبدو عديمة الوزن .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

- ١ - تحويل الزاوية المقاسة بالدرجة أو الزاوية النصف قطرية أو الدورة الى كل من الوحدات الأخرى .
- ٢ - استخدام العلاقة $\theta = \omega t$ في المواقف البسيطة التي تكون فيها اثنتان من الكميات الثلاث (θ ، ω ، t) معلومتين .
- ٣ - حساب التسارع الزاوي لعجلة عندما تكون الكميات ω_0 ، ω_1 ، t معلومة .
- ٤ - كتابة المعادلات الخمس للحركة الزاوية وتعريف كل من الكميات الموجودة بها . ذكر الشرط الأساسي لتطبيقها .
- ٥ - استخدام معادلات الحركة الزاوية الخمس في حل المسائل .
- ٦ - شرح العلاقة بين زاوية دوران عجلة θ والمسافة التي تندرجها العجلة أو طول الخيط الذي يلتف حولها . إيجاد θ أو s لعجلة معلوم نصف قطرها اذا كانت احدى الكميتين السابقتين معلومة .
- ٧ - شرح الفرق بين السرعة المماسية والسرعة الزاوية . حساب احدى هاتين الكميتين لعجلة نصف قطرها معلوم اذا كانت الأخرى معلومة . شرح مدى أهمية السرعة المماسية بالنسبة الى عجلة متدحرجة وبالنسبة الى عجلة تلف شيئا ما على حافتها .
- ٨ - شرح ماذا نعني بالقوة الجاذبة المركزية ولماذا يجب توفيرها للجسم اذا أريد له أن يتبع مسارا دائريا . ذكر علاقة القوة الجاذبة المركزية والقدرة على استخدامها في المواقف البسيطة التي يتحرك فيها الجسم في دائرة أفقية أو رأسية .
- ٩ - إثبات أن الجسم الذي يتحرك في مسار دائري يتسارع باستمرار بالرغم من أن سرعته الزاوية ثابتة وذلك باستخدام الرسم التخطيطي . ذكر اتجاه ومقدار التسارع النصف قطري .
- ١٠ - حساب القوة الحاملة التي تؤثر على جسم معلوم الكتلة اذا كان هذا الجسم متحركا بسرعة ثابتة ، متسارعا الى أعلى ، متسارعا الى أسفل . شرح معنى الوزن الظاهري في هذه الظروف ولماذا يختلف عن وزن الجسم .
- ١١ - شرح لماذا يقال أن الجسم الذي يدور في فلك حول الأرض (أو أى موقف آخر مشابه) يسقط سقوطا ذاتيا . توضيح لماذا تبدو الأجسام عديمة الوزن في ظروف معينة بأسلوبك الخاص .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتي :

المقياس النصف قطري

النظم الزاوي لكل من s ، v ، a

معادلات الحركة الزاوية الخمس

$$s = r\theta, v_T = r\omega, a_T = r\alpha$$

تسارع الجذب المركزي

القوة الجاذبة المركزية

بالرغم من أن الجسم يتحرك في مسار دائري بمعدل حركة ثابت فإنه يتسارع .

الوزن الظاهري وانعدام الوزن

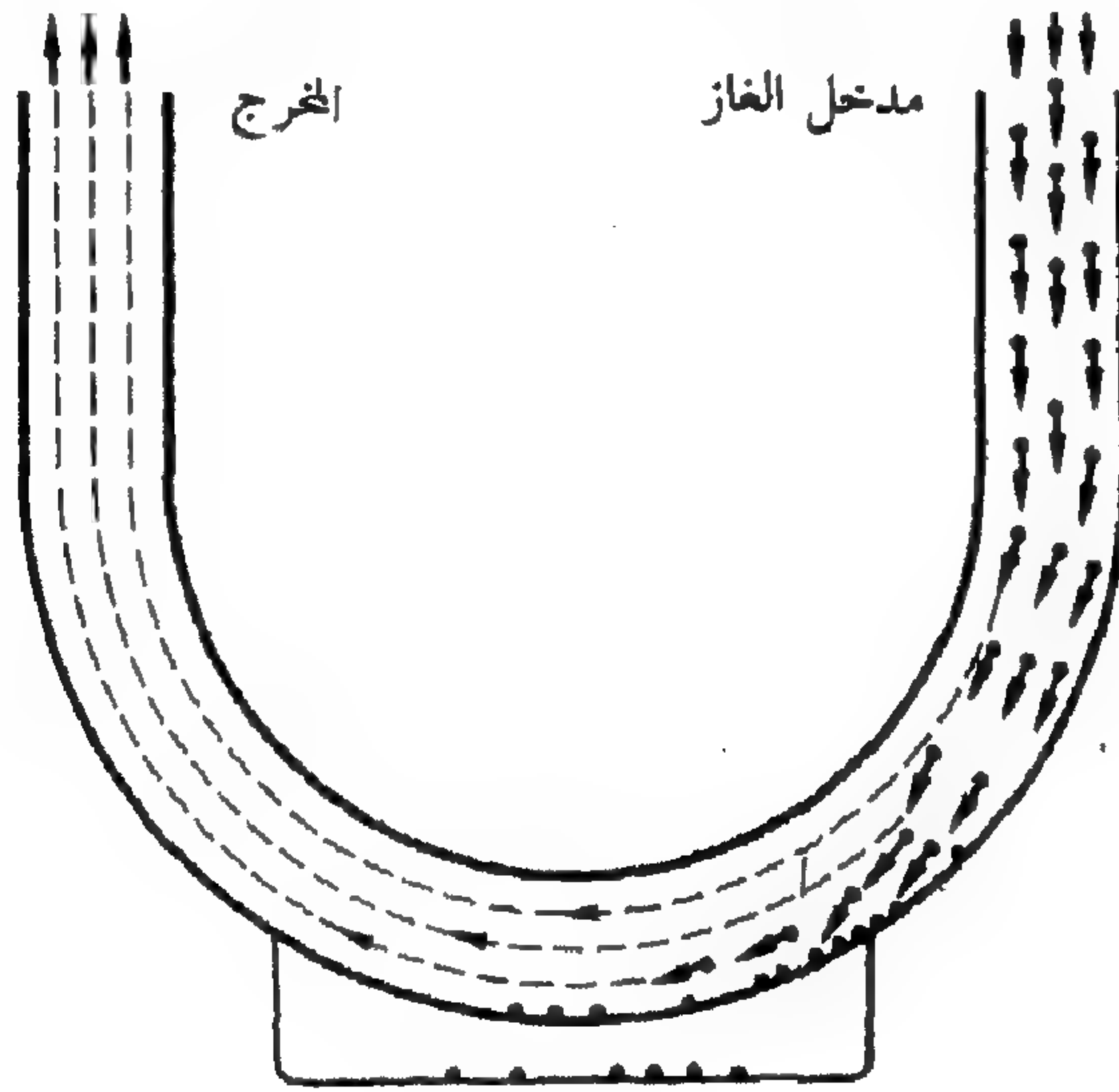
يسقط التابع الأرضي باستمرار نحو الأرض .

اسئلة وتخمينات

١ - تتبع الأرض مسارا دائريا تقريبا وتوجد الشمس في مركز الدائرة. بفرض أن هذا صحيح تماما اشرح لماذا لا يبدل الجذب الثقالي للشمس المؤثرة على الأرض أى لشغل ؟ ماذا تفعل قوة جذب الشمس للأرض ؟

٢ - في أى اتجاه يطير الطين المتطاير من اطار الدراجة ؟ اشرح .

٣ - يمثل الشكل م ٧ - ١ نموذجا مبسطا لمزيل غبار من النوع الاعصاري ، وهو يستخدم على نطاق واسع لتنقية العودام الغازية الصناعية قبل اطلاقها الى الجو . ويتم ذلك بأن يدار الغاز بسرعة عالية في مسار منحن فتنجمع دقائق الغبار عند الطرف الخارجى ثم تزال بالاستعانة برذاذ الماء أو بأية طريقة أخرى . اشرح المبدأ الذى بنيت على أساسه هذه الطريقة لإزالة مادة معينة من الهواء الملوث .



شكل (م ٧ - ١)

٤ - ناقش دورة التجفيف المغزلى فى الغسالة المنزلية الأوتوماتيكية .

٥ - عندما يقوم الطيار بالاعتدال من انقضااض حاد بطائرته فإنه يقع تحت تأثير قوة تبلغ عدة اضعاف قيمة g ، أى أن مقعد الطيار فى الطائرة يجب أن يدفع الطيار بقوة تساوى عدة اضعاف وزنه . ماهو سبب وجود هذه القوة ؟ واذا كان الإعتدال من الانقضااض سريعا جدا فإن الطيار يفقد وعيه مؤقتا . لماذا ؟

٦ - تستقر حشرة على عجلة مستوية منسأ يمكن أن تدور حول محور رأسى عمودى على مستوى العجلة ومار بمركزها . صف بطريقة كيفية حركة الحشرة عندما تبدأ العجلة فى الدوران . افترض أن الحشرة قريبة جدا من المحور وأن هناك بعض الاحتكاك - ولكن ليس كبيرا - بين الحشرة والعجلة . (العجلة يمكن أن تكون القرص الدوار للحاكي - الفونوغراف - على سبيل المثال) .

٧ - يقال أن الشخص الموجود داخل تابع أرضي عديم الوزن . اشرح ماذا نعني بذلك . لماذا لا تسقط الاجسام مقتربة من الأرض في داخل السفينة بالرغم من وجودها تحت تأثير جذب الجاذبية الأرضية ؟

٨ - يمثل الشكل م ٧ - ٢ رسما تخيليا لمحطة فضائية دوارة لأحد الفنانين . بفرض أن الدوران يتم كما هو مبين . هل اختار الفنان الاتجاه « أعلى » الصحيح في الكبسولة الفضائية عند A ؟ اشرح .

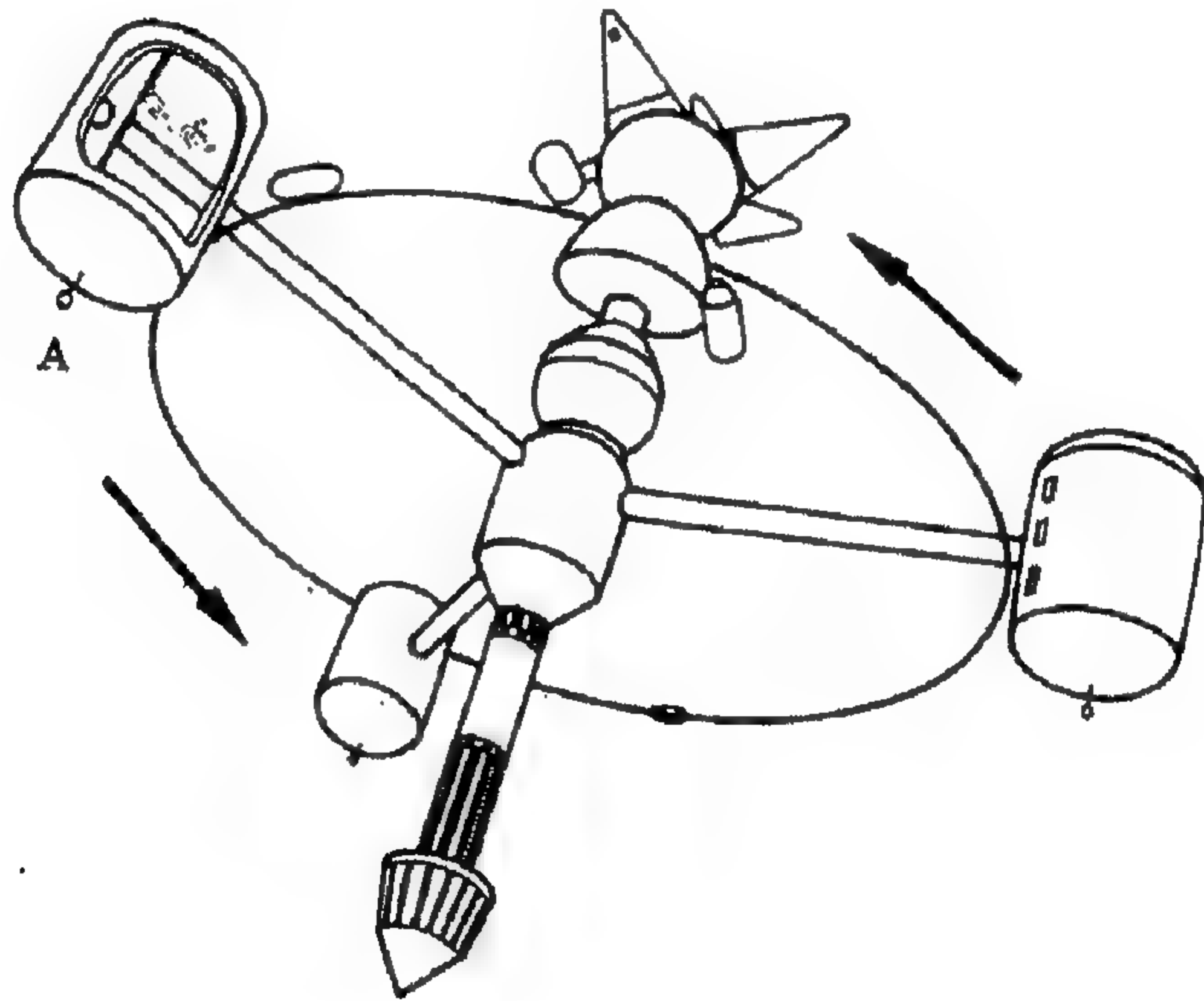
٩ - تزن سيدة نفسها يوميا على ميزان حمام زنبركي . افترض أن الأرض قد توقفت عن الدوران حول محورها . هل سيكون وزن هذه السيدة أكبر أو أقل أو مساويا لوزنها الحقيقي ؟ هل للمكان الذي تعيش فيه السيدة على الأرض أية أهمية في هذا الشأن ؟

١٠ - تستقر بقعة على قمة كرة بولينج مشمعة حديثا . ثم فقدت البقعة رسوخ اقدامها فانزلقت على الكرة متجهة الى أسفل اشرح لماذا تترك البقعة سطح الكرة قبل أن تسقط الى نصف الطريق الى أسفل .

١١ - قدر كتلة الأرض اذا علمت أن القمر يدور حولها في مدار نصف قطره حوالي 3.8×10^8 m . (ق)

١٢ - بأي سرعة يجب أن تسير سيارة عند انحرافها من شارع الى آخر عمودي عليه . افترض أن الشارعين مصنوعان من الخرسانة ومتوسطا الحجم وأن اتجاه المرور في كليهما واحد . (ق)

١٣ - أثناء طيران أبوللو ١٣ الى القمر في عام ١٩٧٠ حدثت مشكلة خطيرة عندما كانت السفينة في منتصف الطريق تقريبا ثم عادت الى الأرض دون اكمال مهمتها . ومع ذلك فقد استمرت السفينة في الحركة تجاه القمر ومرت عبر جانبه الآخر وعندئذ فقط عادت الى الأرض . لماذا لم يعد المشرفون على الرحلة السفينة ببساطة عند اتخاذ قرار اعادتها مباشرة بدلا من الاستمرار في الرحلة تجاه القمر .



شكل (م ٧ - ٢)

مسائل

١ - عبر عن كل من الزوايا الآتية بالدرجات والدورات والزوايا النصف قطرية :

(أ) 250° ، (ب) 8.1 rad ، (ج) 0.73 rev .

٢ - تدور بكرة مثبتة في محور موتور بمعدل قدرة 1400 rev/min . ماهي سرعتها الزاوية (أ) بالزوايا النصف قطرية في الثانية ، (ب) بالدرجات في الثانية ؟

٣ - يحتاج عمود موتور كبير معين لزمن قدرة 20 s لكي يتسارع بانتظام من السكون الى سرعة التشغيل وقدرها 16 rev/s . اوجد (أ) التسارع الزاوي للعمود الموتور (بالدورات في الثانية المربعة) ، (ب) عدد الدورات التي يدورها في هذا الزمن .

٤ - ماهو التسارع الزاوي (بالزوايا النصف قطرية في الثانية) الذي يجب أن تكتسبه عجلة لكي تسارع من السكون الى سرعة دوران قدرها 520 rad/s بعد أن تكمل 7.5 rev ؟

- ٥ - الزمن اللازم لعجلة روليت معينة لكي تصل الى السكون هو 15 s فاذا كانت العجلة تدور 8.5 rev في ذلك الزمن فبأى سرعة كانت تدور العجلة في البداية ؟ (افترض أن التقاصر منتظم) .
- ٦ - توجد بقعة صغيرة من الغبار على بعد 5.0 cm من مركز اسطوانة خاكي تدور بمعدل قدره $33 \frac{1}{3}$ rev/min . (أ) ماهى السرعة التى تتحرك بها الاسطوانة بالزاويا النصف قطرية فى الثانية عندما يكون الخاكي دائرا ؟ (ب) بأى سرعة تتحرك بقعة الغبار بالسنتيمترات فى الثانية ؟
- ٧ - نصف قطر الأرض هو 6.37×10^6 m . (أ) بأى سرعة (بالامتار فى الثانية) تتحرك شجرة عند خط الاستواء نتيجة لدوران الأرض ؟ (ب) وبأى سرعة (بالامتار فى الثانية) يتحرك دب قطبي عند القطب الشمالى ؟
- ٨ - عجلتان مسننتان معشقتان سويا نصف قطرهما 0.50 cm و 0.15 cm . ما هو عدد الدورات التى يجب أن تدورها العجلة الصغيرة عندما تدور الكبيرة 3 rev ؟
- ٩ - تدور عجلة قطرها 2 in بسرعة قدرها 1800 rev/min فاذا كان هناك خليط يلتف حول العجلة أثناء دورانها فما طول الخليط الذى يلفه العجلة فى زمن قدره 3 s ؟
- ١٠ - تسير مركبة فى طريق بمعدل قدرة 20 m/s . فاذا كان قطر عجلاتها 80 cm ، فما هى سرعة العجلات بالدورات فى الثانية والزاويا النصف قطرية فى الثانية والدرجات فى الثانية ؟
- ١١ - تبدأ سيارة قطر عجلاتها 80 cm المحركة من السكون وتتسارع بانتظام الى سرعة قدرها 15 m/s . ما عدد الدورات التى تدورها كل عجلة فى هذا الزمن ؟
- ١٢ - يتقاصر موتور دائر بمعدل 1800 rev/min بانتظام إلى السكون فى زمن قدره 15 s . (أ) اوجد تسارعه الزاوى وعدد الدورات التى يدورها قبل التوقف . (ب) واذا كان الموتور مجهزا بعجلة نصف قطرها 5 cm مثبتة فى عموده فما طول السير الذى تلفه العجلة فى الزمن اللازم للتوقف ؟
- ١٣ - ماهى القوة اللازمة لحفظ سيارة وزنها 3600 lb فى قوس نصف قطره 20 ft عندما تدور السيارة حولى ملتقى طريقين بسرعة قدرها 40 ft/s ؟
- ١٤ - فى احد العاب التسلية بالملاهى تدور العربات الصغيرة على سطح مستو فى نهاية قضبان طويلة . افترض أن وزن العربة وشاغليها 2000 N وأن طول القضيب 3.0 m . ماهى القوة الشادة (الشد) التى يجب أن يحملها القضيب عندما يدير العربة فى دائرة نصف قطرها 3.0 m بمعدل 1 rev فى 2 s ؟
- ١٥ - تقف حشرة كتلتها 3.0 mg على الحافة الملساء لأسطوانة خاكي نصف قطرها 25 cm ثم بدأت الاسطوانة فى الدوران من السكون لتصل إلى سرعة الدوران المعتادة وهى 45 rev/min . ما قيمة معامل الاحتكاك بين الحشرة والأسطوانة الضرورى لكي لا تنزلق الحشرة من فوق الاسطوانة ؟ (يمكن إهمال احتكاك الهواء نظرا لأن الحشرة مكثزة جدا) .
- ١٦ - فى أحد أجهزة البحث العلمى تعرض شخص لتسارع قيمته $5g$ ، أى خمس مرات قدر تسارع الجاذبية . وقد تحقق ذلك بادارة هذا الشخص فى دائرة أفقية بسرعة عالية جدا . وقد كان البعد بين مقعد هذا الشخص ومحور الدوران 20 ft . بأى سرعة يدور الشخص (بالدورات فى الثانية) إذا كانت القوة الجاذبة المركزية المؤثرة عليه خمس مرات قدر وزنه ؟
- ١٧ - من الحيل القديمة الشهيرة أن تحمل فى يدك سطلا من الماء وتديره فى دائرة رأسية ، فاذا كان معدل الدوران كبيرا بدرجة كافية فإن الماء لن يسقط من السطل عندما يكون السطل مقلوبا فى قمة المسار . ماهو الحد الأدنى لمعدل حركة يدك عند قمة الدائرة إذا أريد لهذه الحيلة أن تنجح ؟ افترض أن طول يدك 0.60 m .
- ١٨ - عجلة فريس عبارة عن جهاز دائرى رأسى كبير يحمل الراكبين على مقاعد أفقية حول الدائرة الرأسية ، وقد كان نصف قطر إحدى هذه العجلات 20 m . (أ) بأى سرعة (بالدورات فى الثانية) يجب أن تدور العجلة بحيث يدفع الراكب المقعد بقوة تساوى $1 \frac{1}{2}$ قدر وزن الراكب عندما يكون الراكب فى قاع الدائرة ؟ (ب) بأى سرعة يجب أن تدور العجلة بحيث لا يؤثر الراكب على المقعد بأى قوة عند قمة الدائرة ؟

١٩ - في أحد نماذج ذرة الأيدورجين (نموذج بوهر) يصور الإلكترون كجسيم يدور حول النواة الموجبة للذرة في مدار دائري (نصف قطره $0.50 \times 10^{-10} \text{ m}$) . وتنشأ القوة الجاذبة المركزية نتيجة للتجاذب الكهربائي بين النواة الموجبة والإلكترون السالب . ماقيمة هذه القوة اذا كان الإلكترون يتحرك بمعدل قدرة $2.3 \times 10^6 \text{ m/s}$ ؟ (كتلة الإلكترون $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$) .

٢٠ - استخدم قانون الجاذبية لحساب معدل حركة الأرض أثناء دورانها حول الشمس بفرض أن الأرض تسير في مدار دائري مركزه الشمس . ($M_{\text{sun}} = 3.3 \times 10^5 M_{\text{earth}}$ ، $M_{\text{earth}} = 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$) والمسافة بين الأرض والشمس تساوي $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$.

٢١ - يبدأ قرص أفقي في الدوران من السكون حول محوره الرأسى بتسارع قدرة 0.50 rev/s^2 . وبعد زمن قدرة 20 s انفصلت كتلة مقدارها 3.0 g كانت ملتصقة في حافة العجلة . ما مقدار القوة التي كانت تثبتها في مكانها ؟ نصف قطر العجلة 40 cm .

٢٢* - تتعلق كرة كتلتها 2.0 kg كبندول في طرف حبل طوله 10.0 m - ازيح البندول جانبا بحيث صنع زاوية قدرها 37° مع الرأسى ثم أعتق . أوجد الشد في الحبل (أ) بعد اعتاقه مباشرة ، (ب) عند مروره بأسفل نقطة في مسار المرجحة .

٢٣ - لاختبار قوة المواد اللاصقة يستعمل جهاز مبنى على فكرة استخدام كتلة m ملتصقة على حافة عجلة أفقية نصف قطرها b ثابت أن القوة التي تستطيع المادة اللاصقة تحملها قبل انفصال الكتلة مباشرة تعطى بالعلاقة $F = 4\pi^2 n^2 b m$ ، حيث n سرعة العجلة بالدورات في الثانية عند انفصال الكتلة .

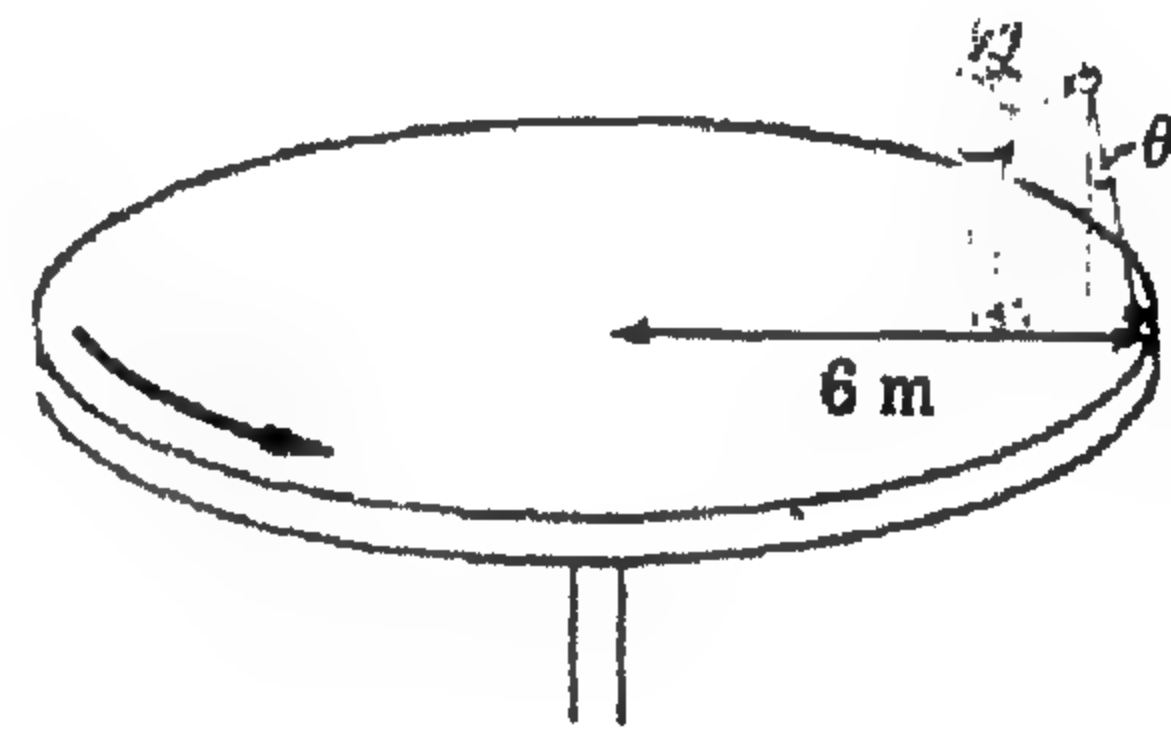
٢٤ - عند وجود التابع الأرضى في مدار دائرى تتساوى قوة الجاذبية تماما مع القوة الجاذبة المركزية اللازمة . بأى سرعة (بالأمتر في الثانية) يجب أن يتحرك التابع الأرضى اذا كان نصف قطر مداره $7.00 \times 10^6 \text{ m}$ أى $0.63 \times 10^6 \text{ m}$ أو 400 mi فوق سطح الأرض ؟

٢٥* - يقف صبي على منصة دوارة ويمسك في يده بندولا يقع على بعد نصف قطر قدره 6.0 m من مركز المنصة كما هو مبين في الشكل ٣ - ٧ . وقد وجد أن البندول يتعلق بحيث يصنع زاوية θ مع الرأسى عندما تكون سرعة دوران المنصة 0.020 rev/s . اوجد θ .

٢٦** - فقدت الحشرة المبينة بالشكل م ٧ - ٤ رسوخ أقدامها عندما كانت قريبة من قمة كرة البولنج فانزلت على الكرة الى أسفل بدون احتكاك يذكر . اثبت أنها سوف تترك سطح الكرة عند الزاوية θ المبينة بالشكل ، حيث تعطى θ بالعلاقة $\cos \theta = \frac{2}{3}$.



شكل (م ٧ - ٤)



شكل (م ٧ - ٣)

الفصل الثامن

دوران الأجسام الجاسئة

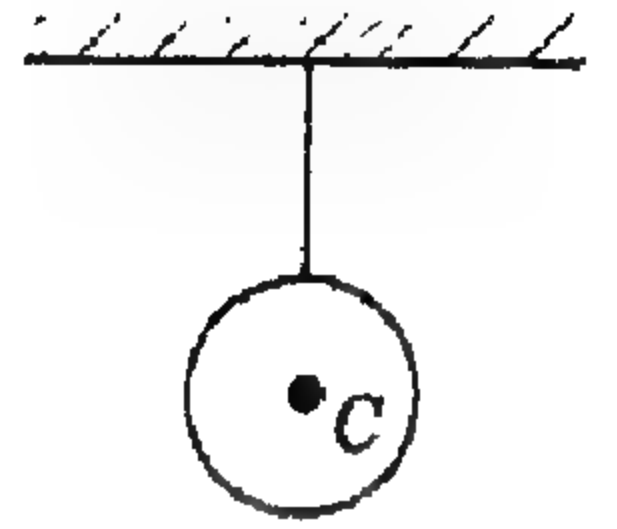
خصصت الفصول المختلفة السابقة لدراسة حركة الأجسام غير الدورانية . وبالرغم من أننا قد درسنا في الفصل الأخير حركة الأجسام في مسارات دائرية ، فإن الأجسام كانت صغيرة بدرجة كافية لأن نهمل حقيقة أن هذه الأجسام ذاتها قد تكون متحركة حركة تدويمية (أو مغزلية) . في هذا الفصل سنتناول بالدراسة الحركة التدويمية للأجسام الكبيرة الجاسئة . وسنرى أن هناك نظيرا لقانون نيوتن الثاني ينطبق على دوران الأجسام ، وسنناقش أيضا مفهوم طاقة الحركة الدورانية وكمية التحرك الزاوي .*

* يمكن ضم الأجزاء من ٨ - ١ الى ٨ - ٥ الى الفصل الأول اذا رأى المدرس ذلك . وتنتمي البنود ذات العلامة * الموجودة في نهاية الفصل الى هذه الأجزاء .

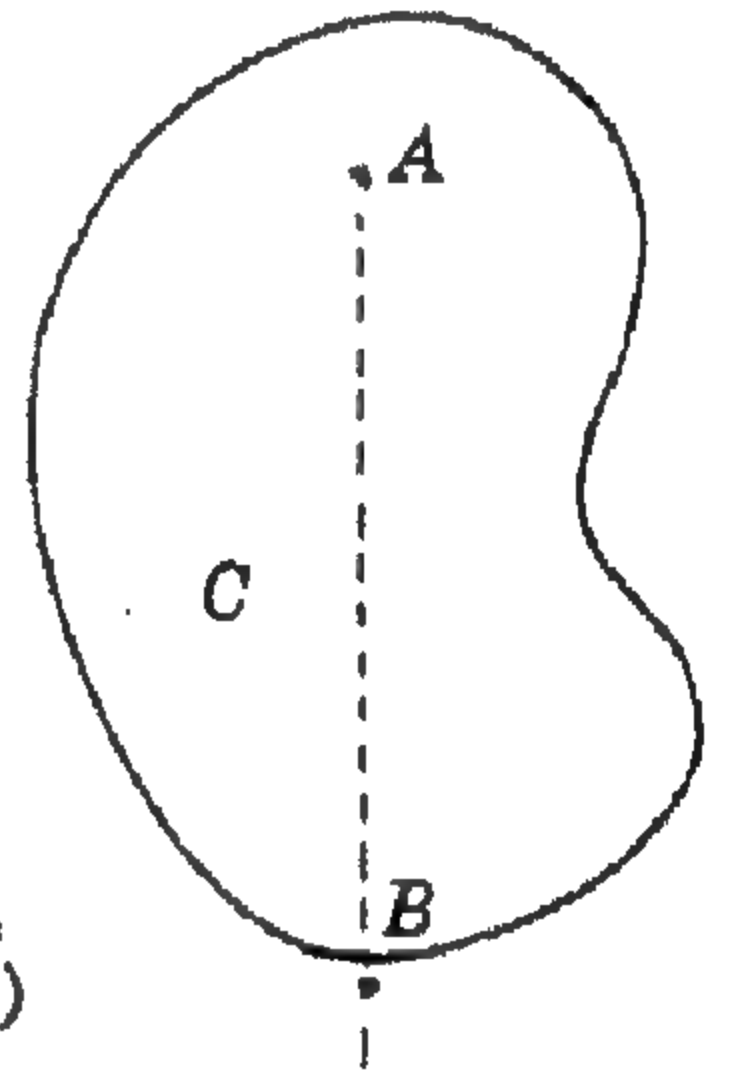
٨ - ١ مركز الثقل ومركز الكتلة :

يمكن تحليل الحركتين الانتقالية والدورانية للأجسام الجاسئة ، أى غير القابلة للتشكيل أو التشويه ، وذلك بسهولة مع الاستعانة بمفهومى مركز الكتلة ومركز الثقل . يعرف مركز ثقل الجسم بأنه تلك النقطة الواحدة التى يمكننا اعتبار أن شد الجاذبية والوزن يؤثر عندها عند دراسة سلوك الجسم . وبإسلوب آخر ، يفضل فى كثير من الحالات ابدال الجسم الكبير بجسم صغير جدا (أو كتلة نقطية) وزنها هو نفس وزن الجسم . فمثلا ، اذا علقت كرة منتظمة فى خيط ، كما هو مبين الشكل ٨ - ١ ، يلاحظ أن النقطة المركزية للكرة توجد دائما تحت الخيط مباشرة . ونستنتج من ذلك أنه لكى نصف جذب الكرة للخيط فى مثل هذه التجربة يمكننا أن نعتبر أن وزن الكرة كله يؤثر عليها عند النقطة C ، أى مركز الكرة . وتسمى هذه النقطة مركز ثقل الكرة . واذا علق جسم فى حبل واحد يقع مركز الثقل تحت نقطة التعليق وعلى نفس خط الحبل . ومركز الثقل هو النقطة التى يمكننا أن نعتبر أن وزن الجسم يؤثر عليها .

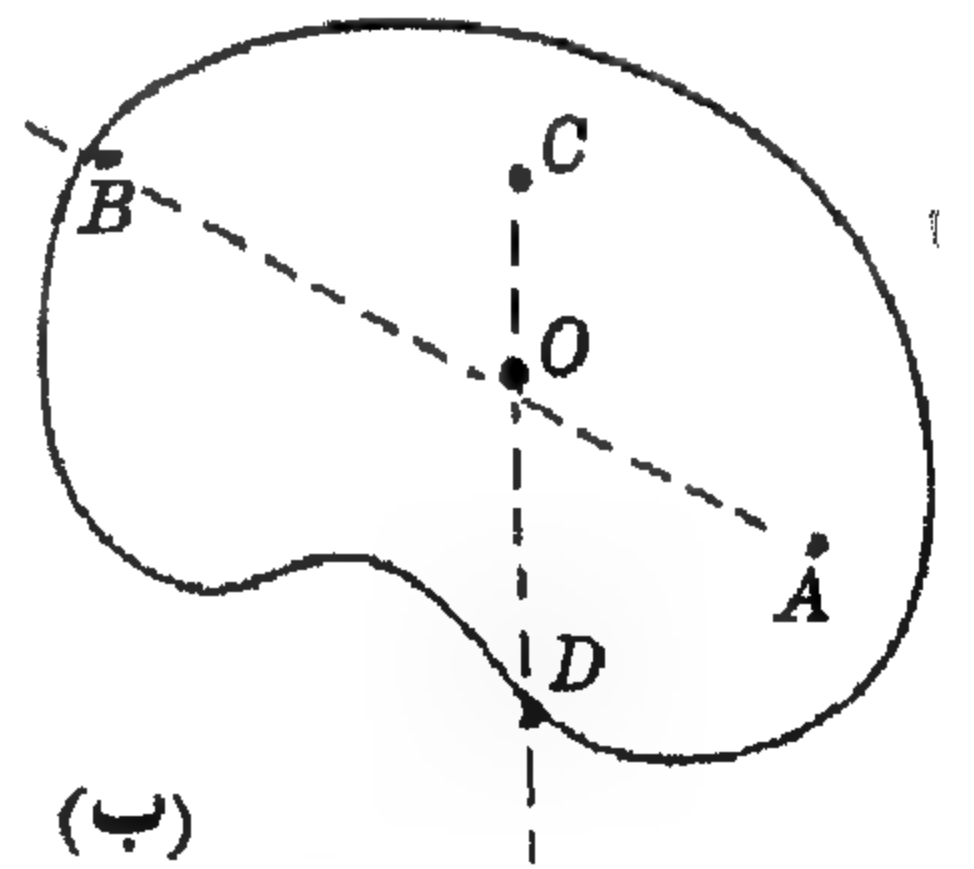
تعريف



شكل (٨ - ١)
يقع مركز ثقل الكرة C تحت
نقطة التعليق مباشرة .



(أ)



(ب)

من السهولة بمكان إيجاد مركز ثقل الأجسام المتماثلة التى لها نقطة مركزية سهلة التعرف عليها . مثلا ، مركز ثقل مستطيل مسطح من ورق الكرتون هو مركزه الهندسى . وهذا صحيح أيضا بالنسبة للمكعب . ومع ذلك فليس من السهل إيجاد موضع مركز الثقل فى حالة الأجسام غير المنتظمة الشكل كصخرة مفلولة أو شخص مثلا . ولكننا نعرف من تعريف مركز الثقل ومن الشكل ٨ - ١ أن مركز ثقل الجسم الجاسئ يتعلق دائما تحت نقطة التعليق مباشرة . وهذه الحقيقة تزودنا بطريقة بسيطة لإيجاد مركز الثقل . اعتبر مثلا جسما مسطحا غير منتظم الشكل كالمبين فى شكل ٨ - ٢ أ . فاذا وضع الجسم على محور ارتكاز لاحتكاكى عند A سيتعلق مركز الثقل تحت نقطة الدوران مباشرة فى مكان ما على الخط AB . واذا علقت الكتلة من نقطة جديدة كالنقطة C فإنها ستتعلق كما هو مبين فى الشكل ٨ - ٢ ب . وفى هذه الحالة لابد أن يقع مركز الثقل فى مكان ما على الخط CD .

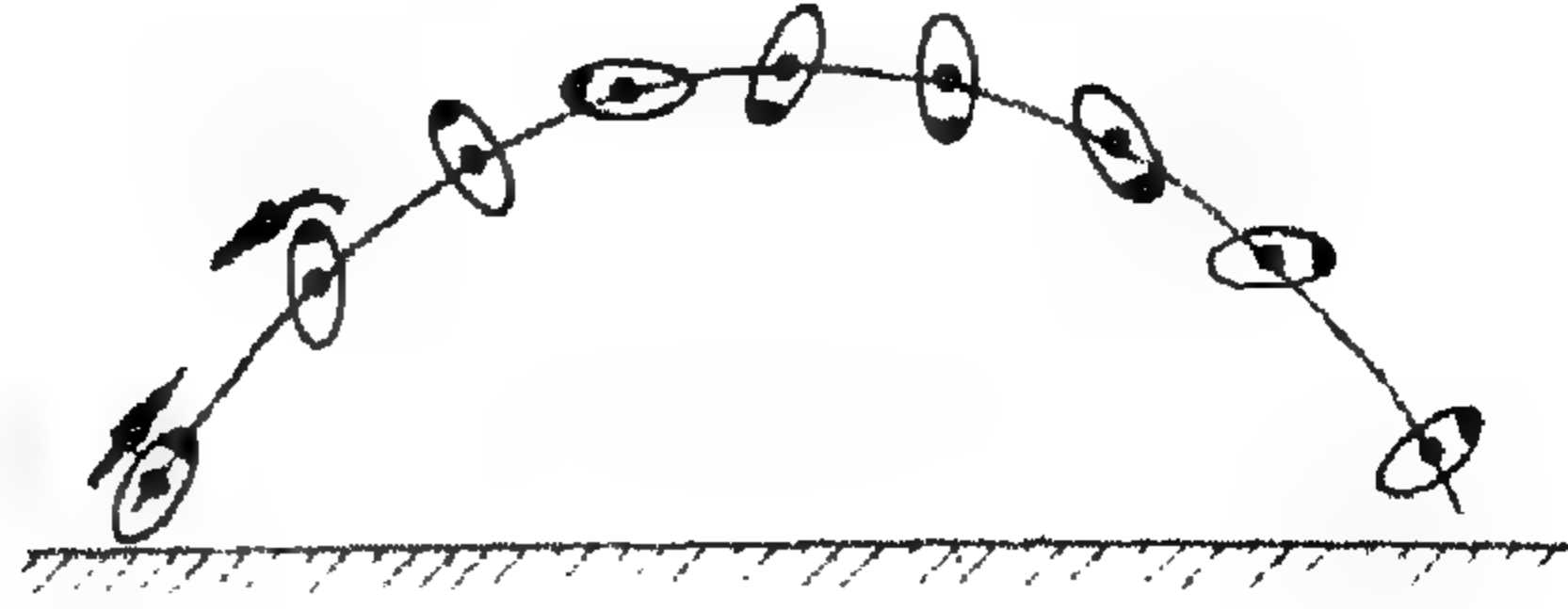
وحيث أن مركز الثقل لابد أن يقع على الخطين AB و CD ، فانه يجب أن يقع عند تقاطع هذين الخطين ، وبالتحديد عند النقطة O . واذا علق الجسم من نقطة دوران مختلفة فان O ستقع كذلك تحت نقطة الدوران مباشرة . هذه اذن هى طريقة عملية بسيطة لإيجاد موضع مركز ثقل الجسم الجاسئ . وطالما وجد الجسم فى مجال جاذبية منتظم فإن مركز الثقل يتطابق مع نقطة هامة أخرى هى مركز كتلة الجسم .

شكل (٨ - ٢)

بعد تعيين المظمارين (أى الخطين الرأسين) AB و CD بتعليق الجسم من النقطتين A و C ، نعرف أن مركز الثقل يقع عند نقطة تقاطع الخطين O .

وسوف نستخدم مركز الكتلة لأن له خاصية فى غاية الأهمية .

عند دراسة الحركة الانتقالية لجسم غير نقطي تحت تأثير قوى خارجية ،
يمكننا أن نفترض أن كتلة الجسم بأكملها موجودة في مركز كتلته .



شكل (٨ - ٣)

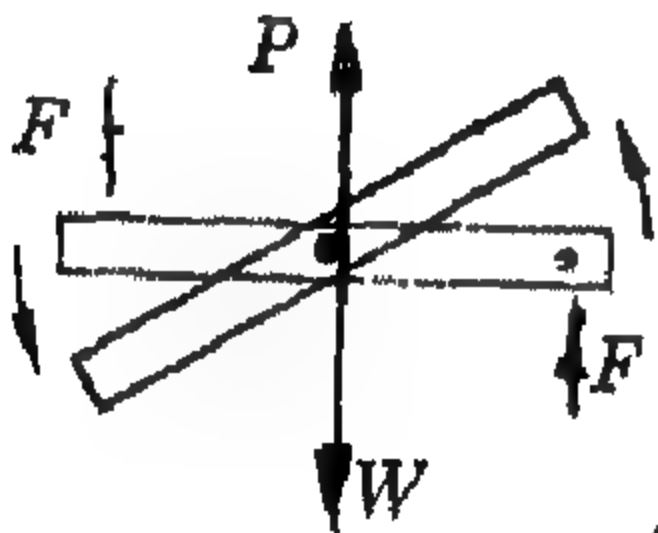
يتبع مركز الكتلة نفس المسار
الذي يجب أن تتبعه كتلة
نقطية تقع تحت تأثير نفس
القوى الخارجية .



(أ)



(ب)



(ج)

وهذا يعني أن الجسم الجاسيء يكافئ كتلة نقطية مساوية موجودة في مركز الكتلة
طالما كنا نهتم بالحركة الانتقالية للجسم تحت تأثير قوة خارجية . لنعتبر مثلاً المقذوف
الدائر الممين في الشكل ٨ - ٣ . في هذه الحالة يتبع مركز الكتلة المنحني الأملس
الممين وهو نفس المنحني الذي يجب أن يتبعه جسم صغير يقع تحت تأثير نفس القوى
الخارجية . وكما سنرى فيما بعد ، تكمن أهمية مركز الكتلة في حقيقة أنه يسمح لنا
بفصل الحركة الانتقالية والحركة الدورانية للجسم . ويتم الحركة الانتقالية للجسم كما لو
كانت كتلته مركزه بأكملها في مركز كتلته .

٨ - ٢ عزم الدوران والشرط الثاني للتوازن

لندرس الآن الشرط اللازم لكي يمنع الجسم من الدوران . نذكر أننا قد ناقشنا في
الفصل الأول الشروط اللازمة لكي يكون الجسم في حالة توازن بشرط إهمال جميع
التأثيرات الدورانية . وقد استنتجنا أن المجموع الإتجاهي لجميع القوى المؤثرة على
الجسم يجب أن يكون صفراً لكي يكون الجسم في حالة توازن . وقد لحصنا ذلك في
الشرط الأول للتوازن ، وهو بالتحديد $\Sigma \mathbf{F} = 0$ ، أو :

$$\Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$$

وسنوجد الآن الشرط اللازم لتحقيقه لكي يكون الجسم في حالة توازن دوراني

شكل (٨ - ٤)

تعلق المسطرة المنتظمة في
الموضعين المبيين بالخطوط
السوداء في (أ) و (ب) ومع
ذلك فإن المسطرة ستدور في
عكس اتجاه عقارب الساعة
في (ج) .

اعتبر تجربة بسيطة جداً . اثقب ثقبين في مسطرة طولها متر أو ياردة بحيث يكون
أحدهما ماراً بمركز المسطرة . والآن ضع مسامراً صغيراً في الثقب البعيد عن المركز
واستعمله كنقطة دوران كما هو مبين في الشكل ٨ - ٤ أ .

من خبرتنا العامة نعلم أن المسطرة لن تتعلق ساكنة صانعة زاوية معينة مع الرأس
كما هو مبين في الشكل ٨ - ٤ أ ، ولكنها سوف تسقط لتتخذ عند السكون وضعاً
رأسياً بحيث يقع مركز الثقل تحت نقطة الدوران كما هو مبين في الشكل . من ناحية

أخرى ، اذا كانت نقطة الدوران في المركز بالضبط ، كما هو مبين في الشكل ٨ - ٤ ب ، فإن المسطرة ستظل ساكنة بأى زاوية نضع المسطرة بها ، في الوضع المبين في الجزء ب مثلاً . وهذا متوقع لأن مركز الثقل يتطابق مع نقطة الدوران . وتؤثر على المسطرة قوتان فقط هما جذب الجاذبية الى أسفل ودفع محور الارتكاز الى أعلى . وعندما تكون المسطرة في حالة السكون لابد أن تكون هاتان القوتان متساويتين في المقدار لأن $\Sigma F_y = 0$ في حالة التوازن .

اعتبر الآن ماسوف يحدث اذا أثرت قوتان F متساويتان في المقدار ومتضادتين في الاتجاه على المسطرة كما هو مبين في الشكل ٨ - ٤ ج . لاحظ أن الشرط الأول للتوازن لازال متحققاً ، لأن $\Sigma F_y = 0$ ولأنه لا تؤثر على المسطرة أى قوة في الاتجاهين x أو z . ولكن الخبرة تبين لنا أن المسطرة لن تستمر الآن في حالة السكون وأنها سوف تبدأ في الدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة كما هو موضح في الشكل . يتضح لنا من ذلك أن الجسم لا يوجد في حالة توازن بالرغم من تحقق الشرط الأول للتوازن . لابد إذن من وجود شرط ثان للتوازن ، وهو ماسنناقشه الآن .

يبين لنا المثال السابق أنه لكي يوجد الجسم في حالة توازن لا يكفي أن يكون $\Sigma F_x = 0$ ، $\Sigma F_y = 0$ ، $\Sigma F_z = 0$ ، ولكن بالإضافة الى ذلك لا يجب أن يكون هناك أى تأثير دوراني محصل للقوى التي تحاول ادارة الجسم . لنفحص الآن التأثيرات الدورانية بتفصيل أكثر حتى يمكننا صياغة الشرط الثانى للتوازن بدقة أكبر . لتحقيق ذلك اعتبر المواقف المبينة في الشكل ٨ - ٥ أ ، ب ، ج حيث تتركز المسطرة على محور الارتكاز عند مركزها في كل حالة .

اذا جذبنا المسطرة في خط مستقيم معها كما في الجزء أ سيتبين لنا أن المسطرة تستمر في حالة السكون ، وعليه فليس للقوة F في هذه الحالة أى تأثيرات دورانية . من ناحية أخرى ، في ترتيبية من النوع المتأرجح كالمبينة في الجزء ب تحاول القوة F أن تدبر المسطرة في عكس اتجاه عقارب الساعة . ولكي نمنعها من ذلك يمكننا أن نسلط قوة على الجانب الآخر للمسطرة . وتبين التجارب الدقيقة أن القوة F المؤثرة على طرف الأرجوحة يمكن أن تتزن مع قوة أخرى يساوى ضعفها مؤثرة على الجانب الآخر من الأرجوحة كما هو مبين بالشكل . وعندئذ تتزن القوة $2F$ التي تحاول ادارة المسطرة حول نقطة الدوران في اتجاه عقارب الساعة تماماً مع القوة F التي تحاول ادارة المسطرة في عكس اتجاه عقارب الساعة . لاحظ أن حاصل ضرب القوة F في بعدها عن محور الارتكاز $L/2$ يساوى تماماً حاصل الضرب $(2F)(L/4)$ بالنسبة للقوة الأخرى .

يمثل الشكل ٨ - ٥ جـ مثالا ثالثا لقوة تدوير المسطرة في عكس اتجاه عقارب الساعة أيضا . وقد وجد من التجربة أن القوة المؤثرة في الاتجاه الممين تسبب تأثيرا دورانيا أكبر مما في الجزء أ وأقل من تأثير F في الجزء ب . وفي الحقيقة تبين التجارب الكمية أن التأثير الدوراني لقوة حول نقطة الدوران تساوى حاصل ضرب القوة في المسافة التي تسمى ذراع الرافعة . وذراع الرافعة هو العمود الساقط من المحور ، أو نقطة الارتكاز ، على خط القوة ، وهو الطول OB في الشكل ٨ - ٥ جـ ويسمى التأثير الدوراني بعزم الدوران . والتعريف الدقيق لعزم الدوران هو :

تعريف

(ذراع الرافعة) (القوة) = عزم الدوران (٨ - ١) عزم الدوران

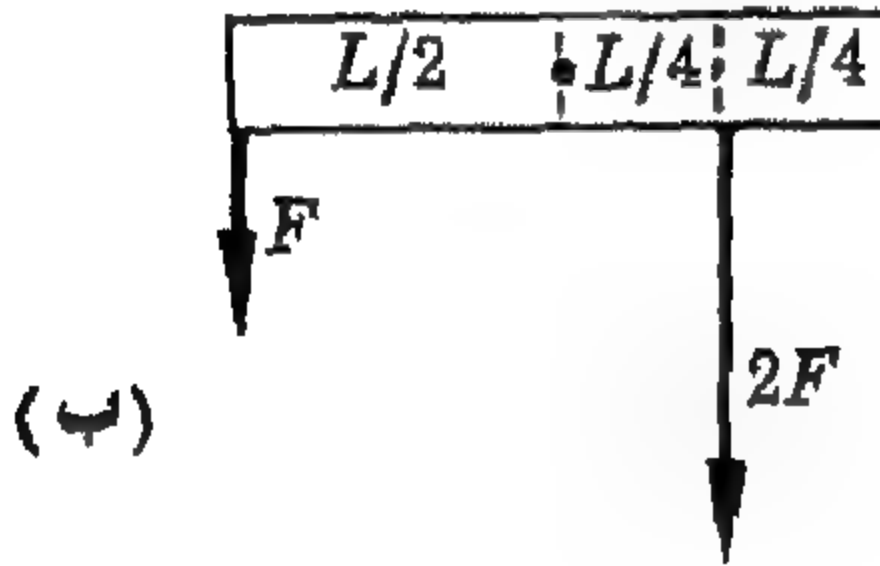
وبالرموز

$$\tau = Fl$$

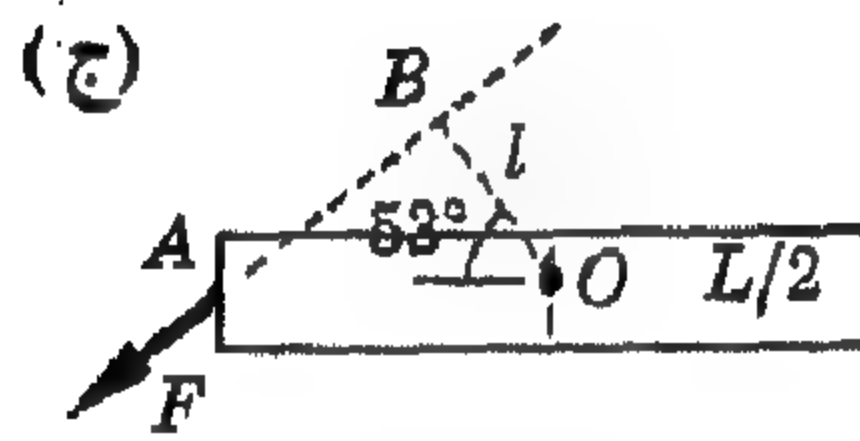
حيث يمثل الرمز τ (تاو) عزم الدوران*



(أ)



(ب)



(ج)

مثال توضيحي ٨ - ١ : اوجد ذراع الرافعة في الشكل ٨ - ٥ أ ، ب ، جـ .
طريقة الحل : ذراع الرافعة في الشكل ٨ - ٥ أ يساوى صفر لأن خط القوة يمر بالمحور . اذن التأثير الدوراني ، أو عزم الدوران ، يساوى صفرا في هذه الحالة لأن :

$$\tau = (F)(0) = 0$$

في الجزء ب ذراع الرافعة للقوة F هو $L/2$. وعليه فإن عزمها الدوراني ، أو تأثيرها الدوراني ، هو :

$$\tau = F \frac{L}{2} = \frac{1}{2} FL$$

لاحظ أن العزم الدوراني نتيجة للقوة $2F$ هو :

$$\tau = (2F)(\frac{1}{4}L) = \frac{1}{2} FL$$

في اتجاه عقارب الساعة وفي هذه الحالة على الأقل يتحقق التوازن اذا كان عزم الدوران في اتجاه عقارب الساعة مساويا لعزم الدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة .

يمثل الشكل ٨ - ٥ جـ حالة أكثر تعقيدا في إيجاد ذراع الرافعة . في هذه الحالة خط القوة هو ذلك الخط الذي يمثل \overline{AB} جزءا منه ، والعمود الساقط من المحور O على هذا الخط هو \overline{OB} . اذن - من التعريف \overline{OB} هو ذراع الرافعة . وحيث أن :

شكل (٨ - ٥)

ليس هناك أى تأثير دوراني محصل على القضيب المرتكز على محور عند مركزه حتى عند وجود القوى المبينة في (أ) ، (ب) . عزم الدوران ، أو التأثير الدوراني ، في (جـ) يساوى القوة F مضروبة في الطول OB .

* لاحظ أن وحدات عزم الدوران هي القوة في المسافة . ولكن هذه هي أيضا وحدات الشغل . ومع ذلك فإن مفهوم الشغل وعزم الدوران مختلفين تماما .

$$\cos 53^\circ = \frac{\overline{OB}}{L/2}$$

ومن الواضح أن ذراع الرافعة في هذه الحالة هو :

$$\overline{OB} = (0.60) \left(\frac{L}{2} \right) = 0.30L$$

وبهذا فإن عزم الدوران هو :

$$\tau = (F)(0.30L) = 0.30FL$$

لاحظ ، كما قلنا سابقا ، أن عزم الدوران ، أو التأثير الدوراني ، في هذه الحالة وسط في المقدار اذا قورن بالشكلين الآخرين .

لنستعرض هنا ما تعلمناه حتى الآن . عزم الدوران أو التأثير الدوراني ، لقوة ما بالنسبة لمحور ، أو نقطة دوران ، يساوى حاصل ضرب القوة في ذراع رافعتها . ذراع الرافعة هو طول العمود الساقط من المحور على خط القوة .

لدينا الآن مايكفى من المعلومات لكي نضع صيغة دقيقة للشرط الثاني (والأخير) للتوازن . تبين التجارب الدقيقة أنه لكي لا يحدث دوران يجب أن تكون عزوم الدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة . ويمكن كتابة هذا الشرط في صورة معادلة بسيطة اذا اعتبرنا أن عزوم الدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة موجبة وعزوم الدوران في اتجاه عقارب الساعة سالبة (أو العكس لأنه لا فرق بين هذا وذاك لأغراض دراستنا) . إذن ، باستعمال التدوين $\Sigma \tau$ الذى يعنى «مجموع جميع عزوم الدوران» يمكننا كتابة الشرط الثانى للتوازن على الصورة :

الشرط الثانى
للتوازن

$$\Sigma \tau = 0$$

فرضنا ضمنا في هذه المناقشة لعزوم الدوران أن حركة الجسم المعنى مقصورة على مستوى واحد ، وفى الحقيقة فإن كثيرا من الحالات الهامة تنتمى الى هذا النوع .

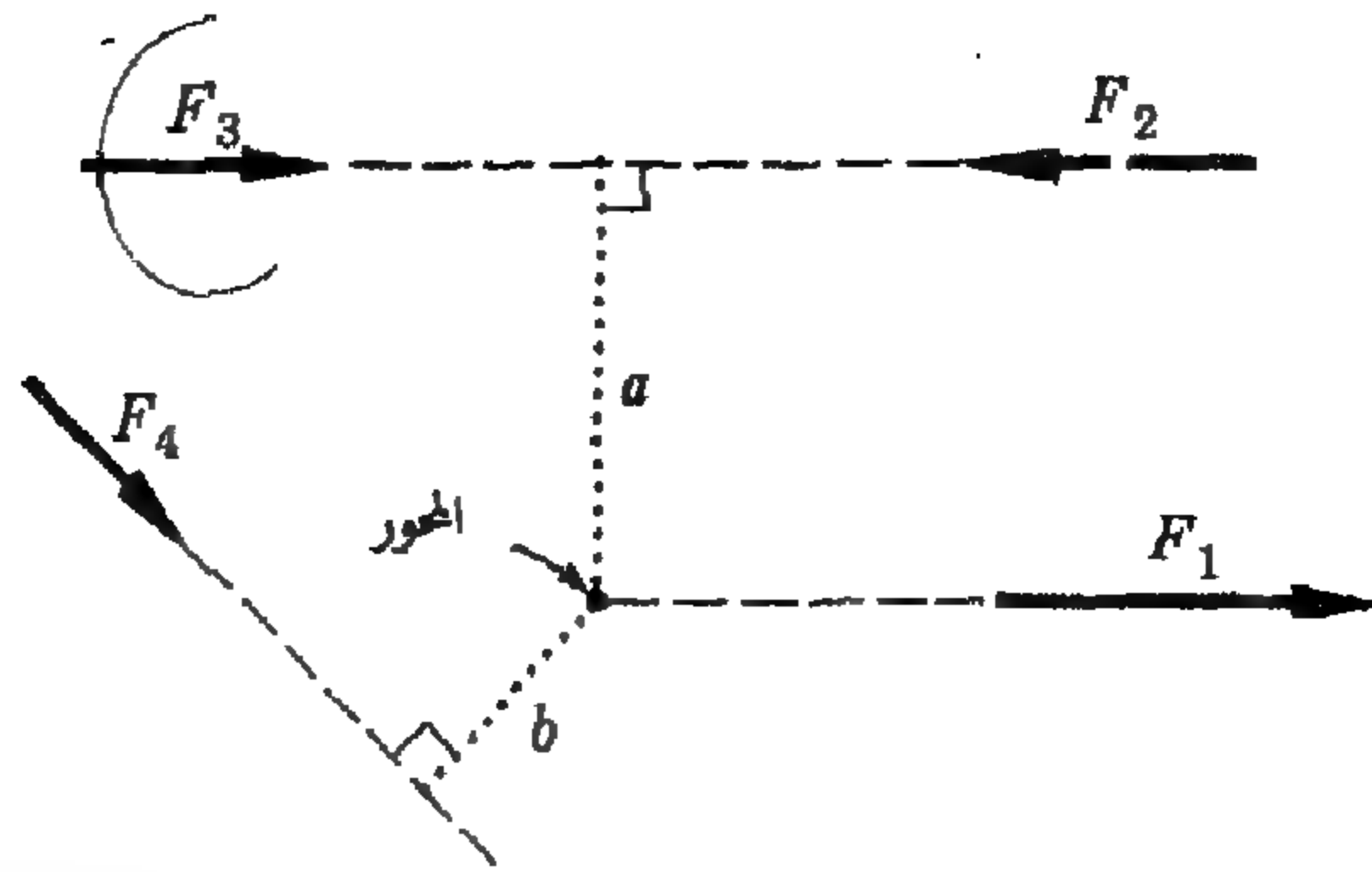
والآن أصبحت جميع الشروط اللازمة لتوازن الجسم معلومة . وتلخص شروط التوازن - فى بعدين - بالعلاقات التالية :

شرط
التوازن

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma F_y = 0 \quad \Sigma \tau = 0$$

(٨ - ٢)

شكل (٨ - ٦)
اوجد ذراع الرافعة لكل قوة
بالنسبة للمحور المبين



وقبل أن نترك هذا الجزء يجدر بنا أن نشير الى ان مصطلح العزم أو عزم القوة تستعمل في بعض الأحيان بدلا من عزم الدوران . وفي هذه الحالة يشار الى ذراع الرافعة بذراع العزم . وبالطبع فإن المفاهيم تظل واحدة .

مثال توضيحي ٨ - ٢ : اوجد ذراع الرافعة لكل من القوى الموضحة في شكل ٨ - ٦ حول نقطة المحور المبينة .

طريقة الحل : يمثل ذراع الرافعة في كل حالة بخط منقط . لاحظ أنه طول العمود الساقط من المحور على خط القوة . اذن :

القوة	ذراع الرافعة	عزم الدوران
F_1	0	0
F_2	a	$+aF_2$
F_3	a	$-aF_3$
F_4	b	$+bF_4$

لاحظ أيضا أن عزم الدوران الناتج من القوتين F_2 ، F_4 في عكس اتجاه عقارب الساعة ، بينما يلاحظ أن عزم الدوران الناتج من F_3 في اتجاه عقارب الساعة . وفي الحالات النموذجية تكون وحدات القوة النيوتن - متر أو الباوند - قدم .

٨ - ٣ توازن الأجسام الجاسئة :

حيث أننا نعلم الآن الشرط الثاني للتوازن يمكننا معالجة جميع المواقف التي يكون الجسم الجاسيء فيها في حالة توازن . لتحليل مثل هذه المواقف يجب علينا أن نتبع الطريقة المذكورة في الفصل الأول ، ولعلك تذكر أن هذه الطريقة تتضمن الخطوات الخمس الأساسية التالية :

- ١ - اعزل الجسم المراد دراسته .
- ٢ - ارسم القوى المؤثرة على الجسم .
- ٣ - حلل القوى الى مركباتها .

٤ - اكتب المعادلات $\Sigma F_x = 0$ ، $\Sigma F_y = 0$ ، $\Sigma \tau = 0$

٥ - حل المعادلات بالنسبة للمجهول .

لنوضح هذه الطريقة باستخدام المثال الآتي :

مثال توضيحي ٨ - ٣ : اعتبر رسام الاشارات المبين في الشكل ٨ - ٧ والذي يقف على لوح خشبي ثخين وزنه 50 lb معلق بحبلين . إيجاد الشد في كل حبل إذا كان وزن الرسام 150 lb .

طريقة الحل : يعزل اللوح الخشبي الثخين كجسم في حالة توازن . القوى المؤثرة عليه موضحة في الجزء ب من الشكل ٨ - ٧ . وحيث أن جميع القوى تؤثر في الاتجاه y فإن العلاقة $\Sigma F_y = 0$ تصبح :

$$T_1 + T_2 - 50 - 150 = 0$$

وقد حذفنا الوحدات من هذه المعادلة للتبسيط ، ولكن يمكنك التحقق من الوحدات المستخدمة في هذه المعادلة بالاستعانة بالمعادلات التي كتبت فيها الوحدات . ولكتابة معادلة عزم الدوران يجب علينا أولاً أن نختار نقطة الدوران أو المحور ، وسوف نناقش مسألة اختيار المحور أو نقطة الدوران بالتفصيل في الجزء التالي . ولكننا في هذه الحالة سنختار مركز ثقل اللوح الخشبي ببساطة كمحور . عندئذ تأخذ المعادلة $\Sigma \tau = 0$ الصورة :

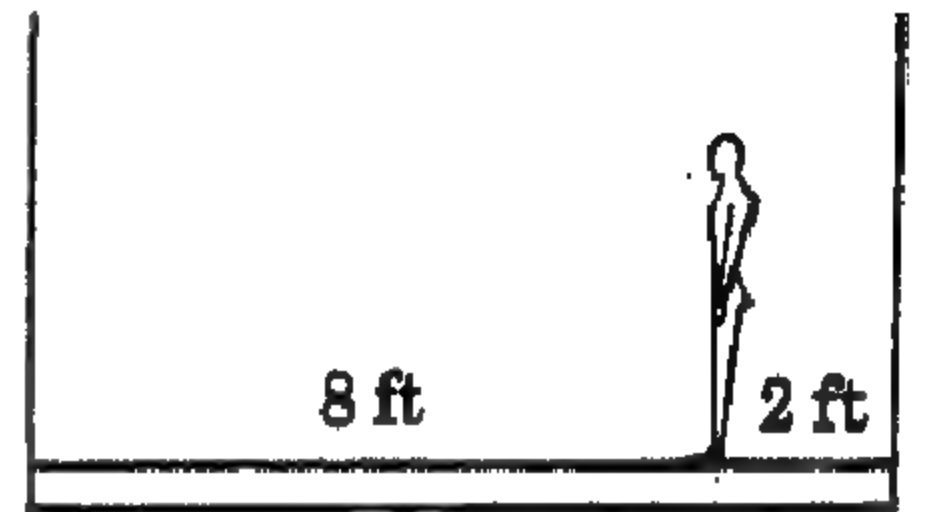
$$(T_2)(5.0) - (150)(3.0) - (T_1)(5.0) = 0 \quad (٨ - ٣)$$

وبحل هاتين المعادلتين آنياً سنجد أن $T_1 = 55 \text{ lb}$ و $T_2 = 145 \text{ lb}$

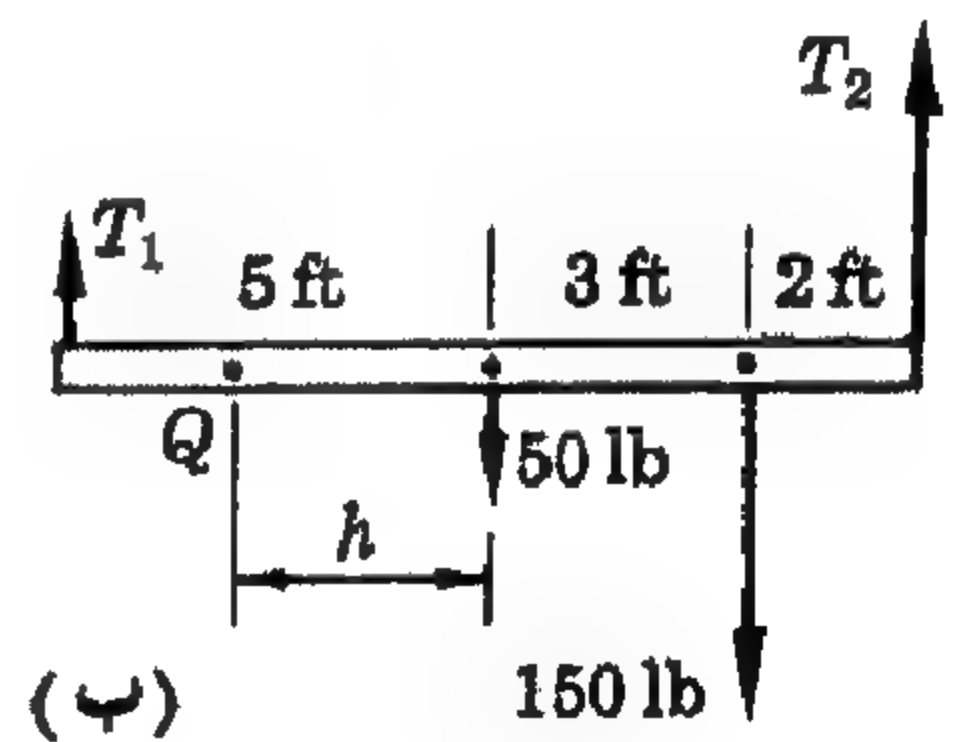
٨ - ٤ موضع المحور اختياري

افترضنا ضمناً في المثال السابق أن محور كتابة معادلة عزم الدوران يمكن أن يؤخذ عند مركز ثقل اللوح الخشبي . وبالرغم من أنه من الممكن إثبات صحة هذا الفرض عملياً ، فإن من غير الملائم إجراء تجربة عملية لتبهر اختيار المحور في كل حالة قد تقابلنا . لذلك فإننا سنحاول أن نبرهن بطريقة عامة أين يباح لنا اختيار نقطة الدوران أو المحور لكتابة معادلة عزم الدوران .

لنتبين الآن ما إذا كانت النقطة Q في الشكل ٨ - ٧ ب نقطة ممكنة لاختيار المحور . تبين التجارب الدقيقة أن مركز اللوح الخشبي نقطة ممكنة للمحور ، وبذلك يمكننا الاستفادة من هذه الحقيقة . لنكتب معادلة عزم الدوران بالنسبة للشكل ٨ - ٧ ب مؤقتاً باستخدام Q كمحور . في هذه الحالة :



(أ)



(ب)

شكل (٨ - ٧)

يراد إيجاد الشد في كل من الحبلين اللذين يحملان لوحاً خشبياً ثخيناً وزنه 50 lb يقف عليه رجل وزنه 150 lb . القوى المؤثرة على اللوح الخشبي مبينة في (ب) .

$$(T_2)(5 + h) - (50)(h) - (150)(3 + h) - (T_1)(5 - h) \stackrel{?}{=} 0$$

حيث تبين علامة الاستفهام الموجودة فوق علامة التساوى أننا لسنا متأكدين في هذه المرحلة مما اذا كان من المسموح أن نستخدم النقطة Q كمحور .

بتجميع الحدود نجد أن :

$$(4 - 8) - (T_1)(5) - (150)(3) + (T_2)(5) + (h)(+T_1 + T_2 - 200) \stackrel{?}{=} 0$$

ولكن الشرط الأول للتوازن يؤكد أن المعامل h في هذه المعادلة يساوى صفرا ، لأن مجموع القوى الرأسية يجب أن يكون صفرا ، أى أن :

$$-T_1 - T_2 + 200 = 0$$

نجد إذن أن الحد الذى يحتوى على h في المعادلة $(4 - 8)$ يساوى صفرا مهما كانت قيمة h . وبهذا فإن h يمكن أن تساوى أى شيء . علاوة على ذلك ، حيث أن الحد الذى يحتوى على h في المعادلة $(4 - 8)$ يساوى صفرا ، فإن المعادلة المؤقتة تصبح :

$$-(T_1)(5) - (150)(3) + (T_2)(5) \stackrel{?}{=} 0$$

ولكن هذه المعادلة هى بالضبط المعادلة $(8 - 3)$ التى نعلم مسبقا أنها صحيحة . يمكننا إذن أن نحذف علامة الاستفهام من هذه المعادلات وأن نستنتج أن من الممكن أن نأخذ أى نقطة Q على طول اللوح الخشبي كمحور . وفى الحقيقة فإن من الممكن أن نثبت بطريقة أكثر عمومية أن محور كتابة معادلة الدوران يمكن أن يؤخذ فى أى مكان وأنه اختياري تماما . لدينا إذن التعبير الكافى لاختيار المحور فى أى مكان نرى أنه مناسب .

مثال توضيحي ٨ - ٤ : حيث أننا نعلم أن اختيار المحور مسألة اختيارية ، لنوجد الآن الشد فى كل من الحبلين فى الشكل ٨ - ٧ مرة أخرى .

طريقة الحل : من الممكن إيجاد الشد فى كل من الحبلين بطريقة أسهل مما فى الجزء السابق اذا اخترنا نهاية اللوح الخشبي المربوط فى الحبل ذى الشد T_1 كمحور . حيث أن خط القوة T_1 يمر مباشرة بهذا المحور الجديد ، فإن ذراع الرافعة للقوة T_1 يساوى صفرا ، وعليه فإنها لا تسبب أى عزم دوران حول هذا المحور . نتيجة لذلك لن يظهر المجهول T_1 فى معادلة عزم الدوران .

وحيث أن عزم الدوران نتيجة للقوة T_1 يساوى صفرا فإن لدينا عزما دوران فقط فى اتجاه عقارب الساعة حول هذا المحور الجديد ، وهما بالتحديد العزمان الناتجان من

القوتين 50 lb و 150 lb . أما القوة T_2 فإنها تسبب عزم دوران في عكس اتجاه عقارب الساعة . وبكتابة معادلة عزم الدوران بالنسبة لهذا المحور الجديد :

$$\Sigma \tau = 0 \quad (T_2)(10) - (50)(5) - (150)(8) = 0$$

وهذه المعادلة تعطينا T_2 مباشرة :

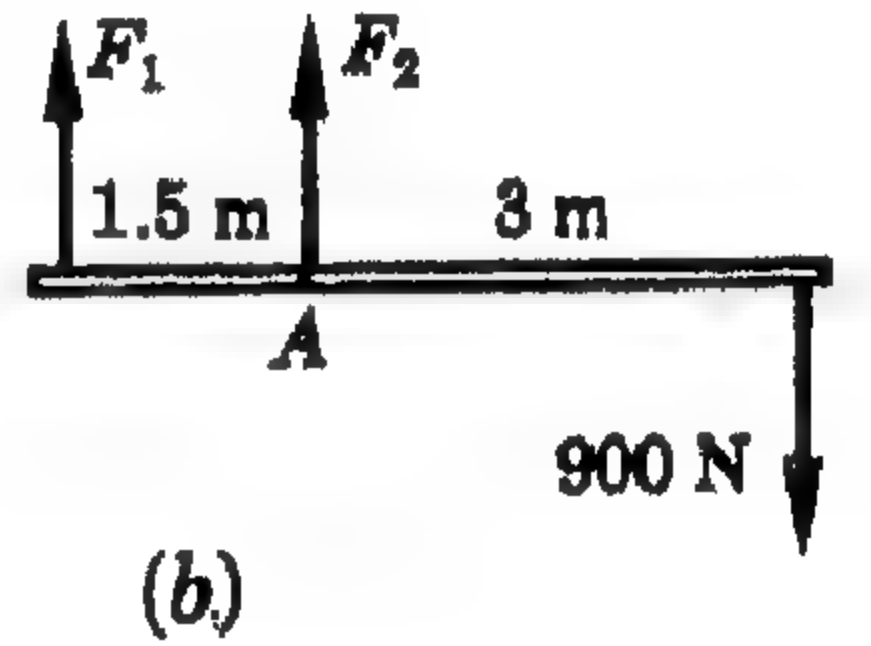
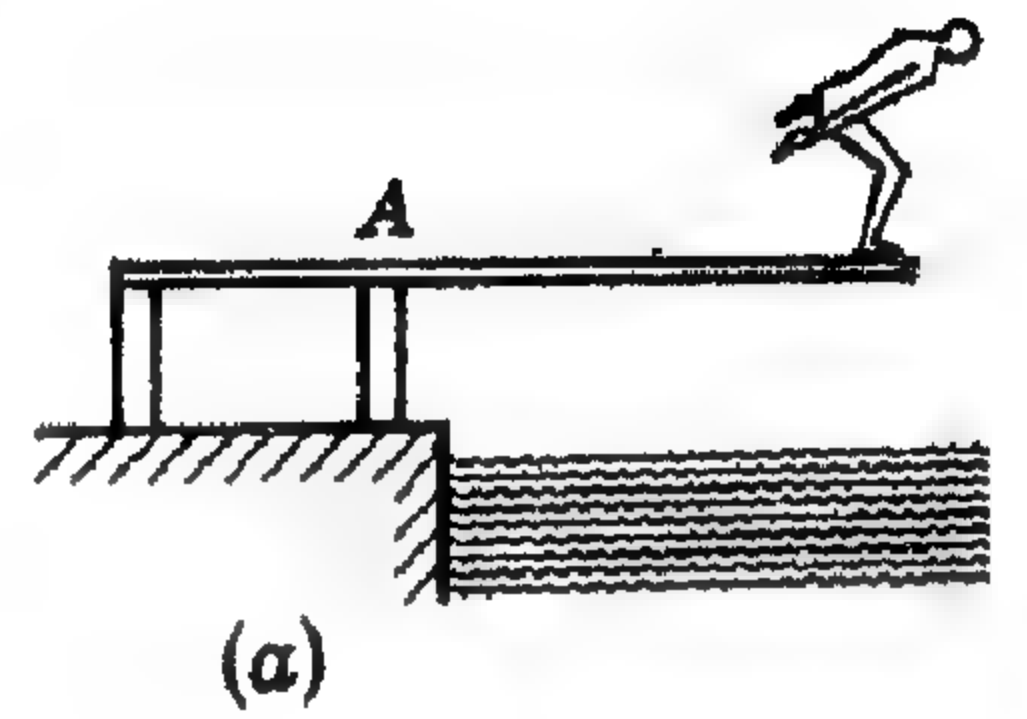
$$T_2 = 145 \text{ lb}$$

لاحظ أنه يمكننا الآن استخدام المعادلة الثانية $\Sigma F_y = 0$ لإيجاد T_1 .

نرى من ذلك اذن أن اختيار المحور في هذا المكان بالذات قد مكنا من تبسيط المعاملات الجبرية بدرجة كبيرة . وفي نفس الوقت وضحنا حقيقة أن المحور يمكن اختياره في أى مكان مناسب .

وعموماً سنختار المحور بحيث يمر خط أو أكثر من خطوط القوى المجهولة المؤثرة على الجسم خلال المحور ، وهذا يبسط الحسابات .

يمكن تبسيط معادلة عزم الدوران بدرجة كبيرة باختيار نقطة المحور على خط قوة مجهولة . وعندئذ لن تظهر هذه القوة في معادلة عزم الدوران .



مثال توضيحي ٨ - ٥ : كما هو مبين في الشكل ٨ - ٨ ، هناك رجل وزنه 900 N على وشك أن يقفز من لوح القفز . اوجد القوى التي يؤثر بها القائمان على اللوح الخشبي . افترض أن وزن القائم مهملاً (900 N تساوى حوالى 200 lb) .

طريقة الحل : يعزل اللوح الخشبي وترسم القوى المؤثرة عليه كما هو مبين في الجزء ب من الشكل . ولكن هناك خطأ في الشكل وهو أننا قد رسمنا القوة F_1 في الاتجاه غير الصحيح ، وهذا خطأ مقصود لنوضح كيف يؤثر ذلك على النتيجة . باختيار النقطة A كمحور ارتكاز نجد أن :

$$\begin{aligned} \Sigma \tau = 0: & \quad -(900)(3) - (F_1)(1.5) = 0 \\ \Sigma F_y = 0: & \quad F_1 + F_2 - 900 = 0 \end{aligned}$$

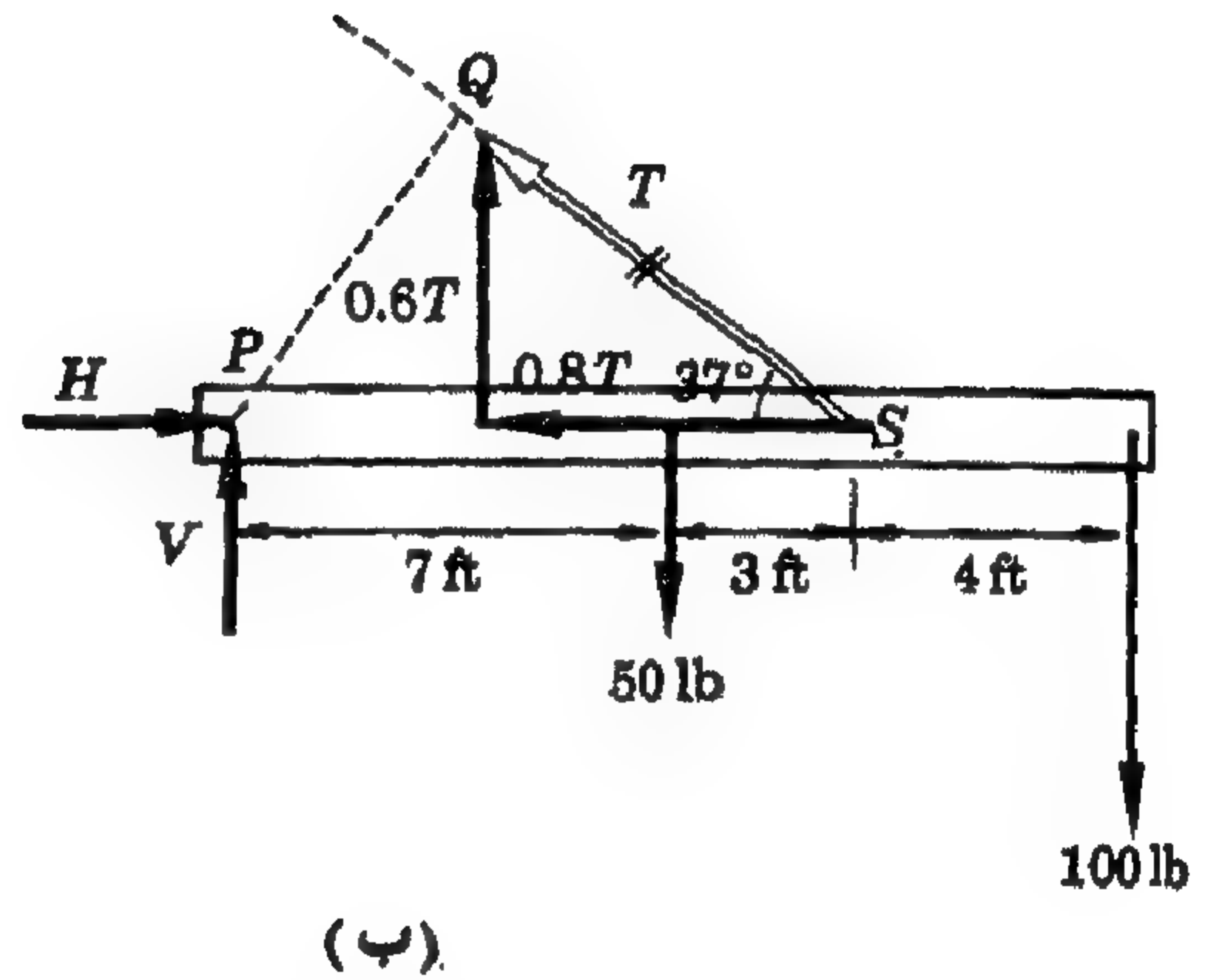
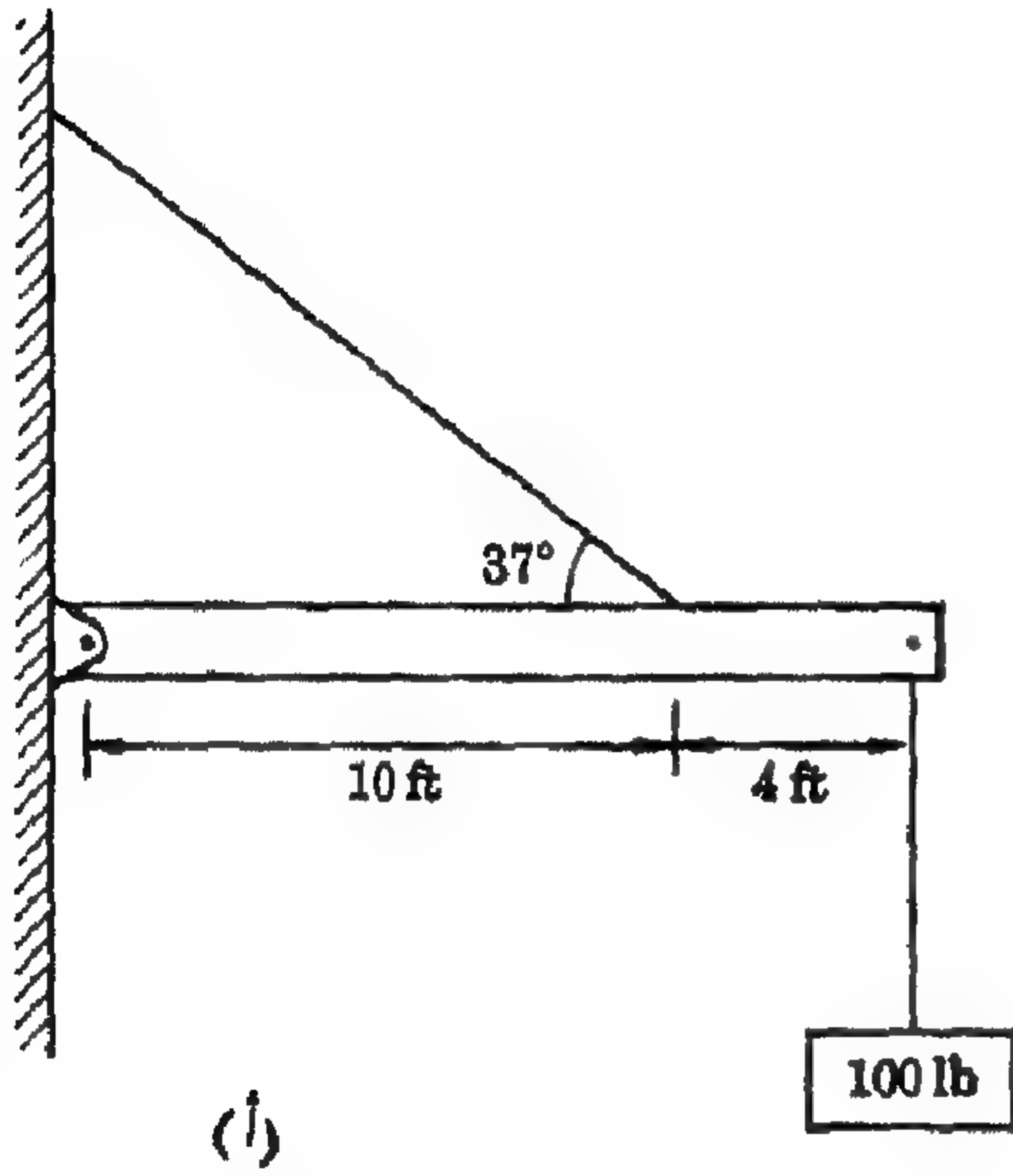
ونحل هاتين المعادلتين نحصل على $F_1 = -1800 \text{ N}$ ، $F_2 = 2700 \text{ N}$. لاحظ أن الإشارة السالبة للقوة F_1 تبين لنا أن هذه القوة قد رسمت في الاتجاه غير الصحيح وأن مقدارها هو 1800 N .

شكل (٨ - ٨)
يقف رجل وزنه 900 N على طرف لوح قفز خفيف . ونحن نضمن خطأ أن القوتين اللتين يؤثر بهما القائمان على اللوح متجهة كما هو مبين .

مثال توضيحي ٨ - ٦ : ماهو الشد في الحبل الذى يحمل العمود المنتظم المبين في الشكل ٨ - ٩ وماهما مركبتا القوة التى يؤثر بها الحائط على العمود إذا كان وزنه 50 lb ؟

شكل (٨ - ٩)
القوى المؤثرة على العمود في
(أ) مينة بالتفصيل في
(ب) . لاحظ أن مركبة القوة
 $0.6T$ تجذب اللوح عند
النقطة S ، ولهذا فإن ذراع
رافعتها هو 10 ft .

طريقة الحل : يعزل العمود المطلوب دراسته وتمثل القوى المؤثرة عليه كما هو مبين في الشكل ٨ - ٩ ب . لاحظ أن وزن العمود وقدره 50 lb يؤثر عليه عند مركز ثقله . لاحظ كذلك أن الشد في الحبل قد استبدل بمركبتيه . ويمكننا حذف مركبتى القوة عند الحائط وهى H و V بأخذ النقطة P كمحور . إذن :



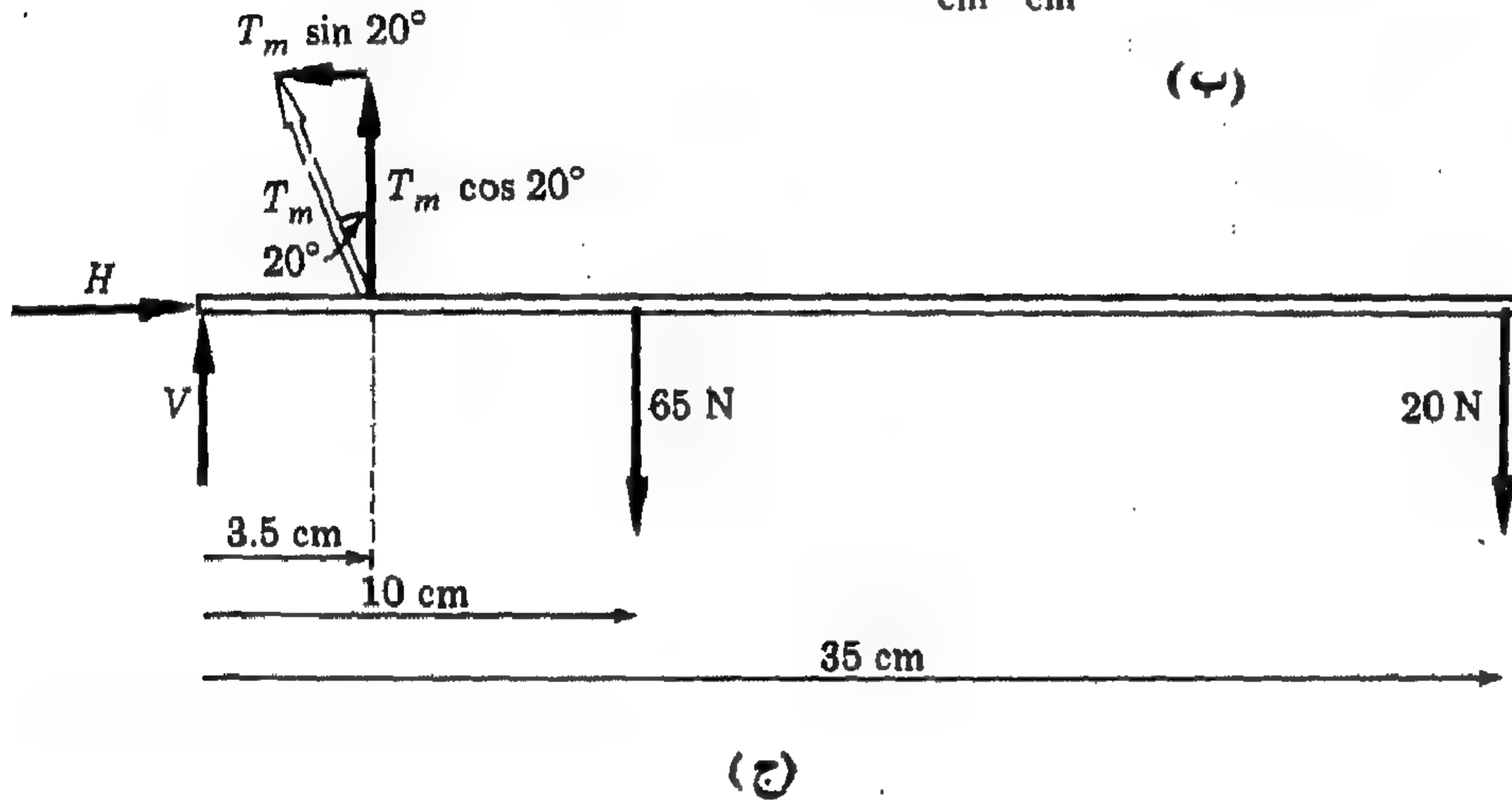
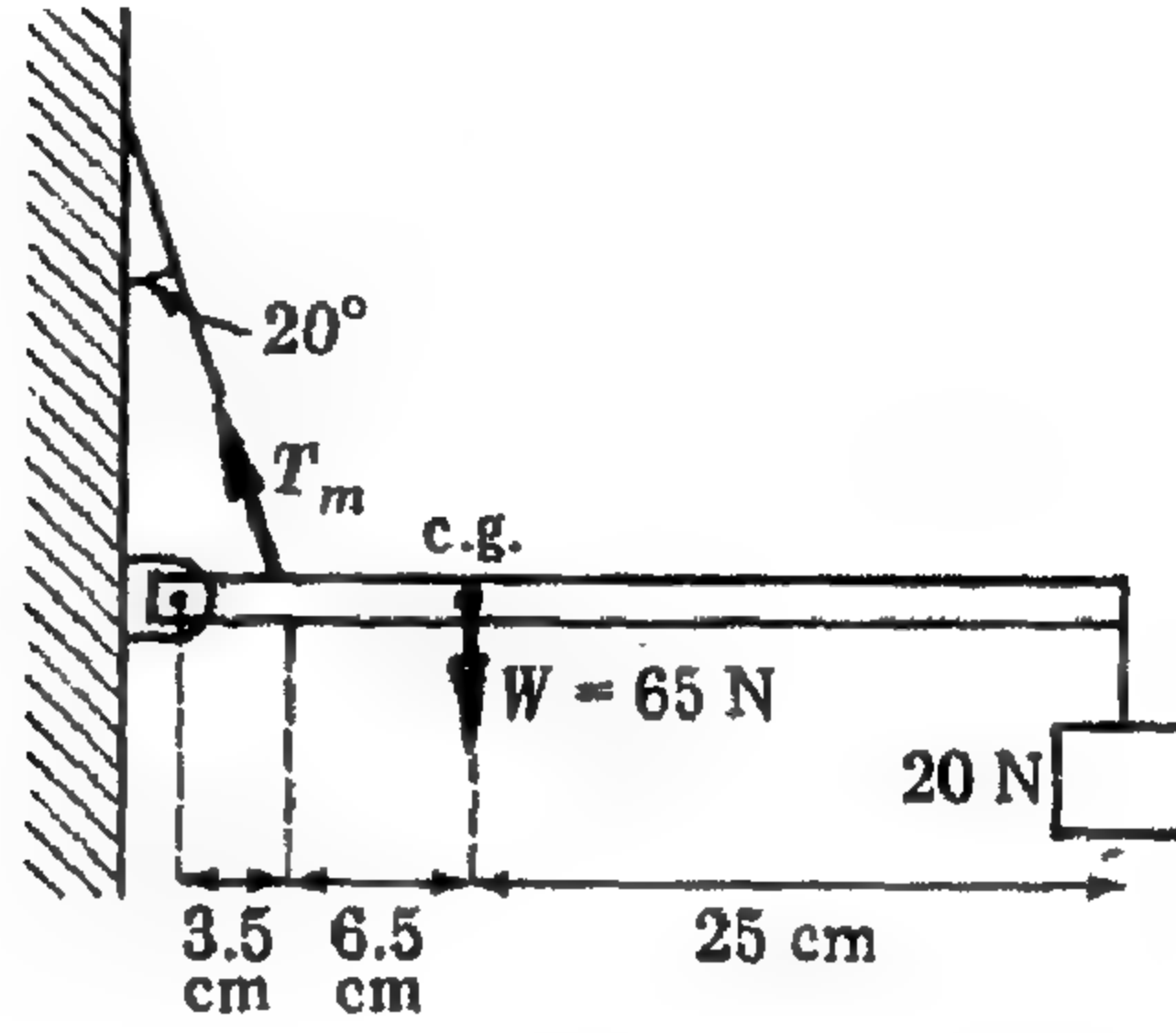
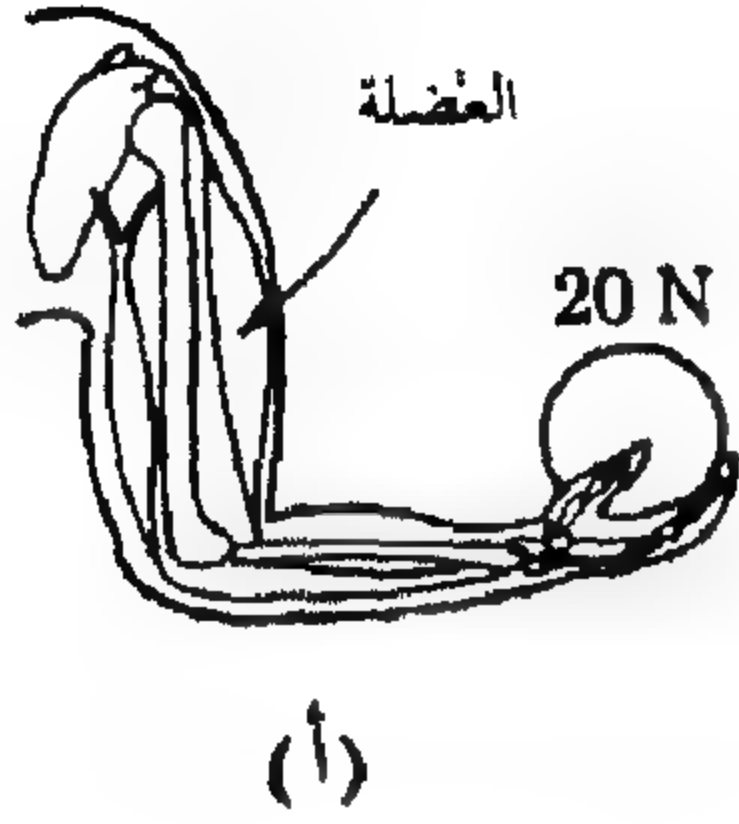
$$\begin{aligned}\Sigma \tau &= 0: & (0.6T)(10) - (50)(7) - (100)(14) &= 0 \\ \Sigma F_x &= 0: & H - 0.8T &= 0 \\ \Sigma F_y &= 0: & V + 0.6T - 50 - 100 &= 0\end{aligned}$$

بحل المعادلة الأولى ، أى معادلة عزم الدوران ، بالنسبة الى T والتعويض في المعادلتين الأخرتين نحصل على :

$$T = 292 \text{ lb} \quad H = 234 \text{ lb} \quad V = -25 \text{ lb}$$

ماذا تعنى إشارة V . السالبة ؟

مثال توضيحي ٨ - ٧ : يحمل شخص ثقلا مقداره 20 N كما هو مبين في الشكل ٨ - ١٠ أ . اوجد الشد في العضلة والقوى المركبة عند الكوع .
 طريقة الحل : يمكن استبدال النظام بالنموذج المبسط المبين في الجزء ب . وسنفرض أن وزن الذراع السفلى هو 65 N . يلاحظ أن الأبعاد المبينة هي الأبعاد الحقيقية .



شكل (٨ - ١٠)
 يمكننا تحليل القوى في الذراع
 الآدمية باستخدام النموذجين
 المبينين في (ب) و (ج) .

لاحظ أن هذا الموقف يشبه كثيرا الموقف المعطى في المثال التوضيحي السابق الذي يمثل عمودا محمولا بواسطة حبل . يمثل الجزء جـ رسم بيان الجسم الحر في هذه الحالة . ويمكننا استخدامه لكتابة شروط التوازن :

$$\begin{aligned} \Sigma F_x = 0: & \quad H - T_m \sin 20^\circ = 0 \\ \Sigma F_y = 0: & \quad V + T_m \cos 20^\circ - 65 - 20 = 0 \\ \Sigma \tau = 0: & \quad (T_m \cos 20^\circ)(0.035) - (65)(0.10) - (20)(0.35) = 0 \end{aligned}$$

حيث أخذ الطرف الأيسر للذراع (الكوع) كمحور . لاحظ أن القوة $T_m \sin 20^\circ$ تؤثر في الواقع خلال المحور ولذلك فإن عزم دورانها يساوى صفرا .

بحل هذه المعادلات نجد أن :

$$T_m = 410 \text{ N} \quad H = 140 \text{ N} \quad V = -300 \text{ N}$$

جميع هذه القوى أكبر كثيرا من وزن الجسم المحمول . هل تستطيع اثبات أن T_m يصبح كبيرا جدا اذا مدت الذراع افقيا ؟ لماذا يكون من المتعب للغاية أن تحمل ثقلا في يدك الممتدة أفقيا ؟

مثال توضيحي ٨ - ٨ : يستند سلم منتظم وزنه 50 lb على حائط أملس كما في الشكل ٨ - ١١ . (يعنى المصطحح « أملس » أن القوة التي يؤثر بها الحائط على السلم عند نقطة التلامس عمودية على سطحه ، وأن الاحتكاك غير موجود) . فإذا وقف صبي وزنه 100 lb على السلم كما هو مبين ، فما قيمة القوتين المؤثرتين عند الحائط والأرض ؟

طريقة الحل : يعزل السلم وتمثل القوى المؤثرة عليه بيانيا كما في الجزء ب من الشكل . وبأخذ النقطة A كمحور ، يمكننا كتابة معادلات التوازن كالتالى :

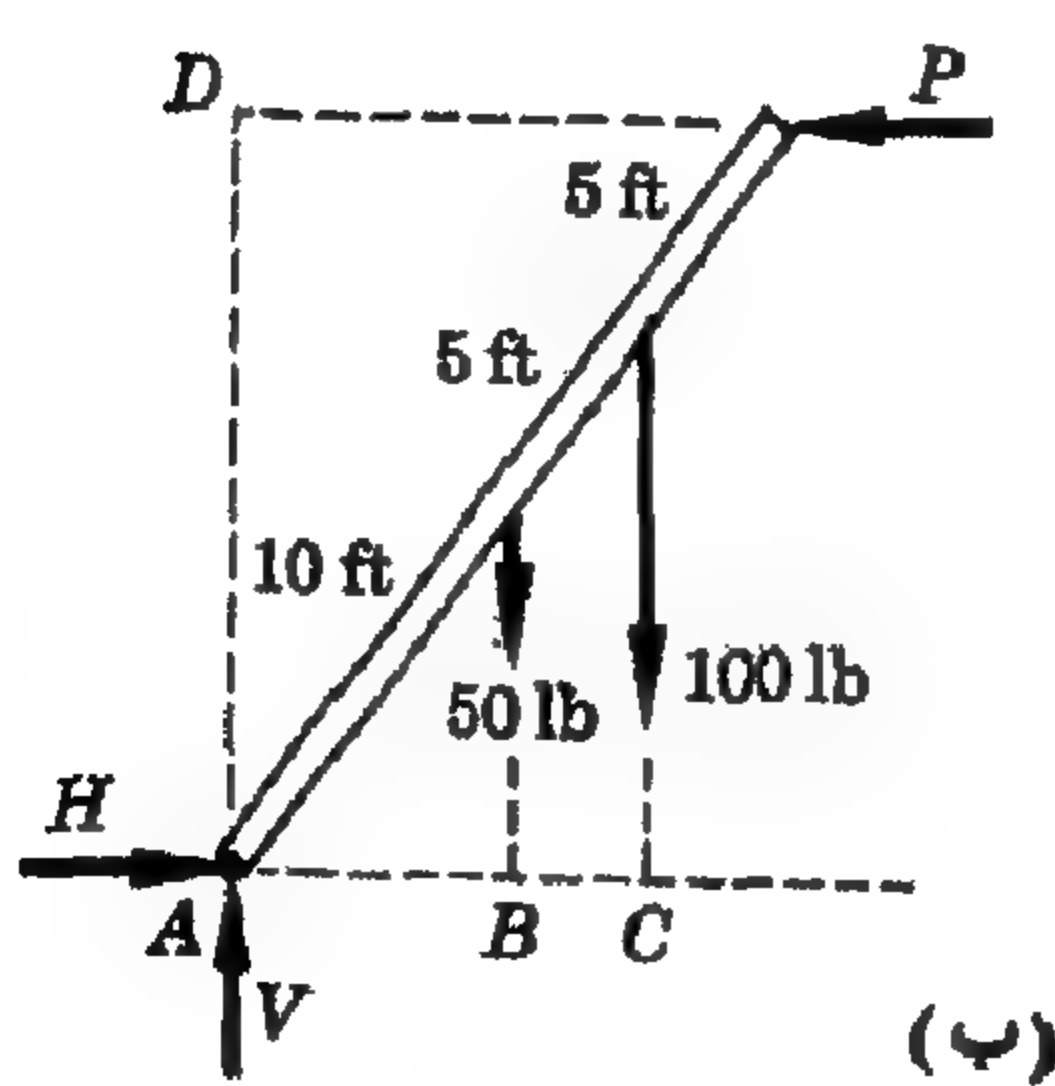
$$\Sigma F_x = 0; H - P = 0$$

$$V = 150 \text{ lb} \quad \text{أو} \quad \Sigma F_y = 0; V - 50 - 100 = 0$$

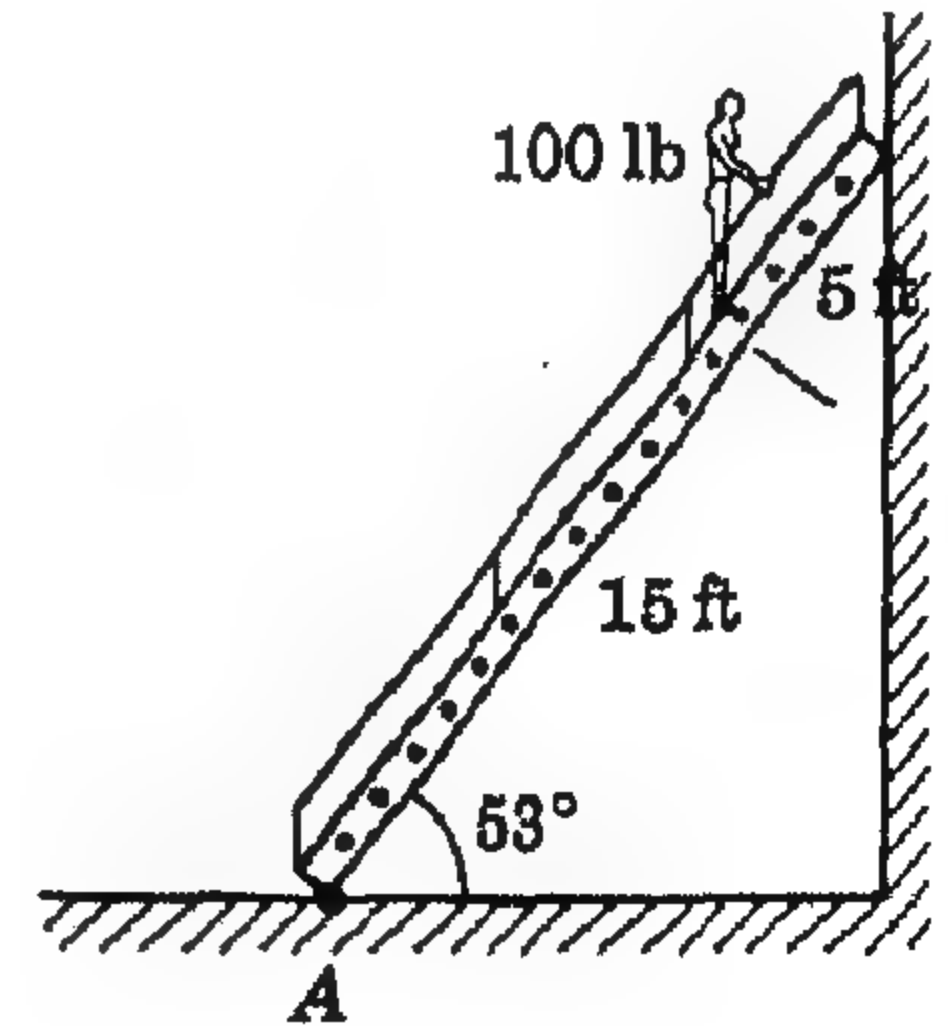
$$\Sigma \tau = 0; (P)(0.8 \times 20) - (50)(0.6 \times 10) - (100)(0.6 \times 15) = 0$$

في هذه المسألة يجب علينا أن نلاحظ أذرع الرافعة على وجه الخصوص . من التعريف ، ذراع الرافعة هو العمود الساقط من المحور A على خط القوة . إذن اذرع الرافعة هي AB ، AC ، AD للقوى 50 ، 100 ، P على الترتيب . وبحل هذه المعادلات آنيا نحصل على :

$$V = 150 \text{ lb} \quad P = H = 75 \text{ lb}$$



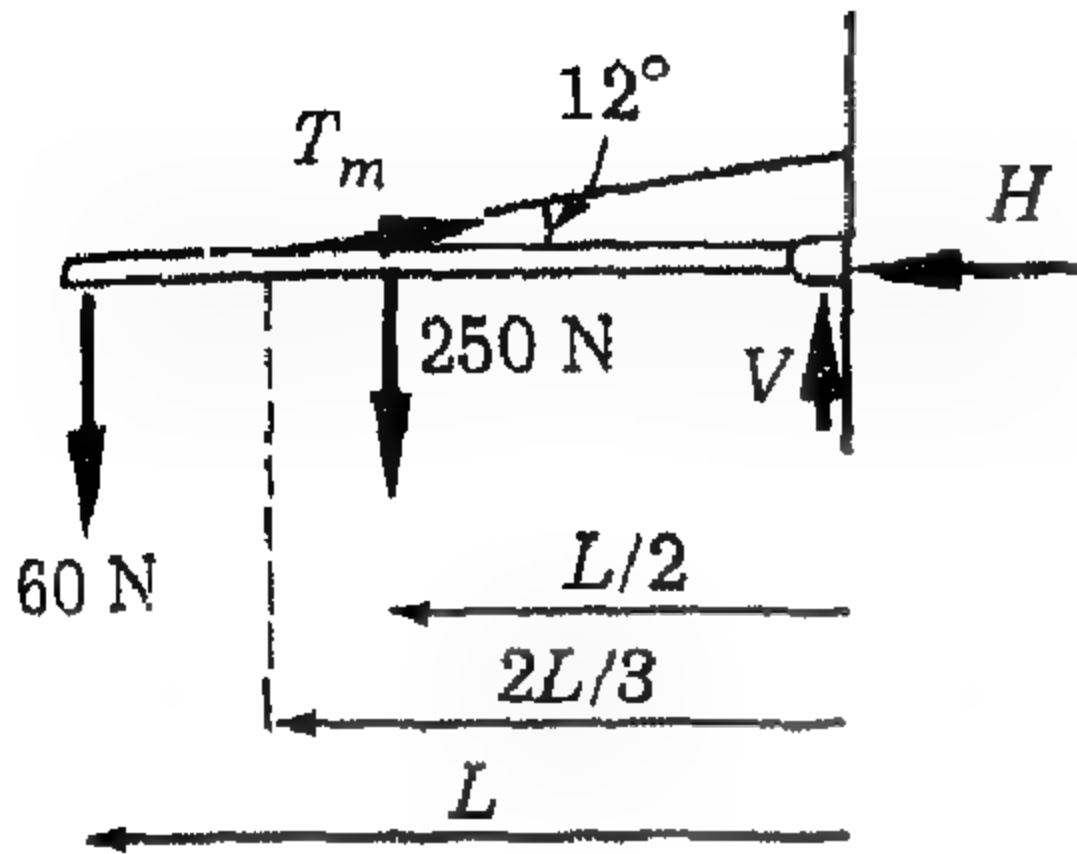
(ب)



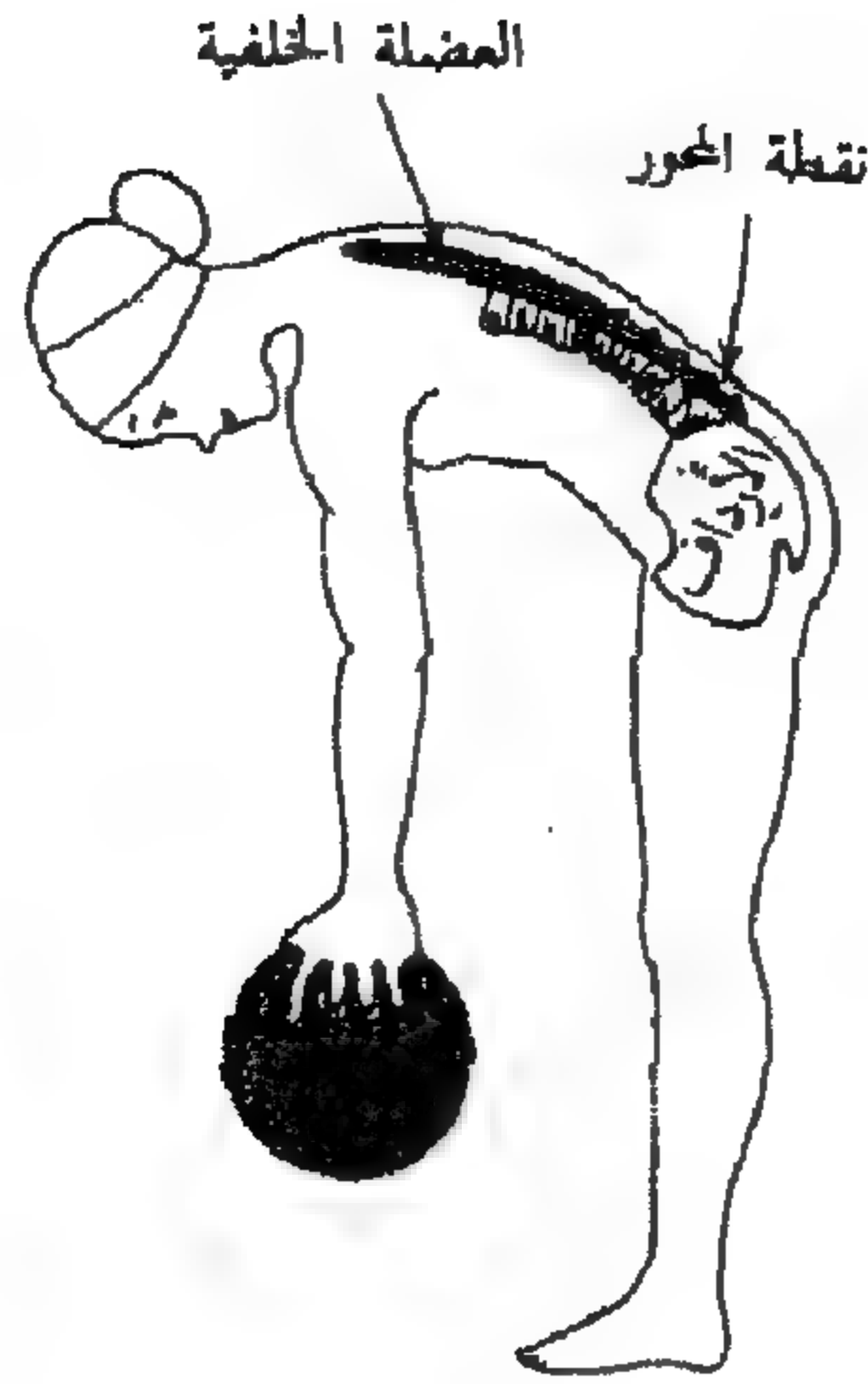
(أ)

شكل (٨ - ١١)

يقف صبي وزنه 100 lb على سلم وزنه 50 lb كما هو مبين . وبفرض أن الحائط أملس ، تكون القوى المؤثرة على السلم كما هو مبين في (ب) .



(ب)



(أ)

شكل (٨ - ١٢)
يمكن إيجاد القوى الموجودة في
ظهر السيدة باستخدام
النموذج المبين في (ب) .

مثال توضيحي ٨ - ٩ : اعتبر سيدة تحمل كرة بولينج وزنها 60 N كما هو مبين في الشكل ٨ - ١٢ أ . إوجد الشد في عضلة ظهرها والقوة التضاغطية في عمودها الفقري .

طريقة الحل : يمكننا تمثيل الجزء العلوي الأفقي من جسم السيدة بعمود كما هو مبين في الشكل ٨ - ١٢ ، والأبعاد مقدرة تقديرا تقريبا كما هو موضح . بأخذ نقطة الدوران كما هو مبين في الشكل ، تكتب معادلات التوازن كما يلي :

$$\Sigma F_x = 0: \quad H - T_m \cos 12^\circ = 0$$

$$\Sigma F_y = 0: \quad T_m \sin 12^\circ + V - 60 - 250 = 0$$

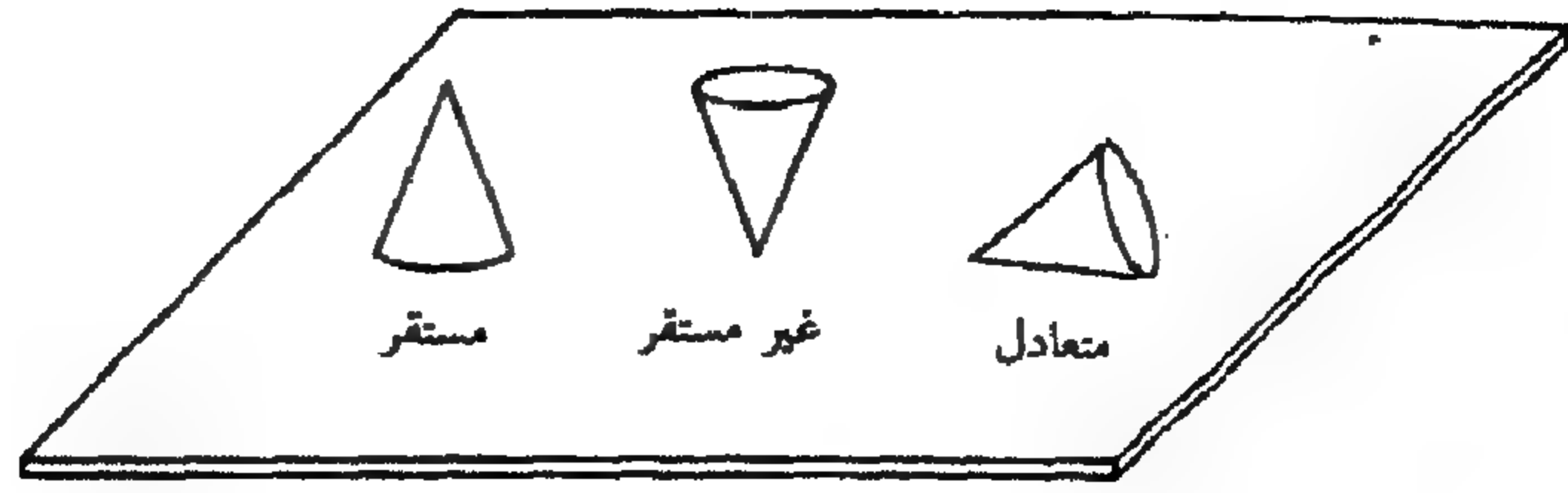
$$\Sigma \tau = 0: \quad (T_m \sin 12^\circ) \left(\frac{2L}{3} \right) - (250) \left(\frac{L}{2} \right) - (60)(L) = 0$$

والآن كيف تنشأ المعاملات التي تحتوي على T_m ؟ . بحل هذه المعادلات نجد أن :

$$T_m = 1335 \text{ N} \quad V = 32 \text{ N} \quad H = 1305 \text{ N}$$

الإنضغاط في الجزء السفلي من العمود الفقري هو H . لاحظ أن $H = 1305 \text{ N} \approx 290 \text{ lb}$ والشد في عضلة الظهر أكبر من تلك القيمة . وبالرغم من أن السيدة تحمل ثقلا قدره 60 N (حوالي 15 lb) فإن القوتين السابقتين أكبر من ذلك . لماذا لا يجب أن نحمل جسما ثقيلًا جدا بالطريقة المبينة ؟ كيف يجب أن نحمل جسما ثقيلًا ؟

شكل (٨ - ١٣)
أنواع التوازن الاستاتي الثلاث.

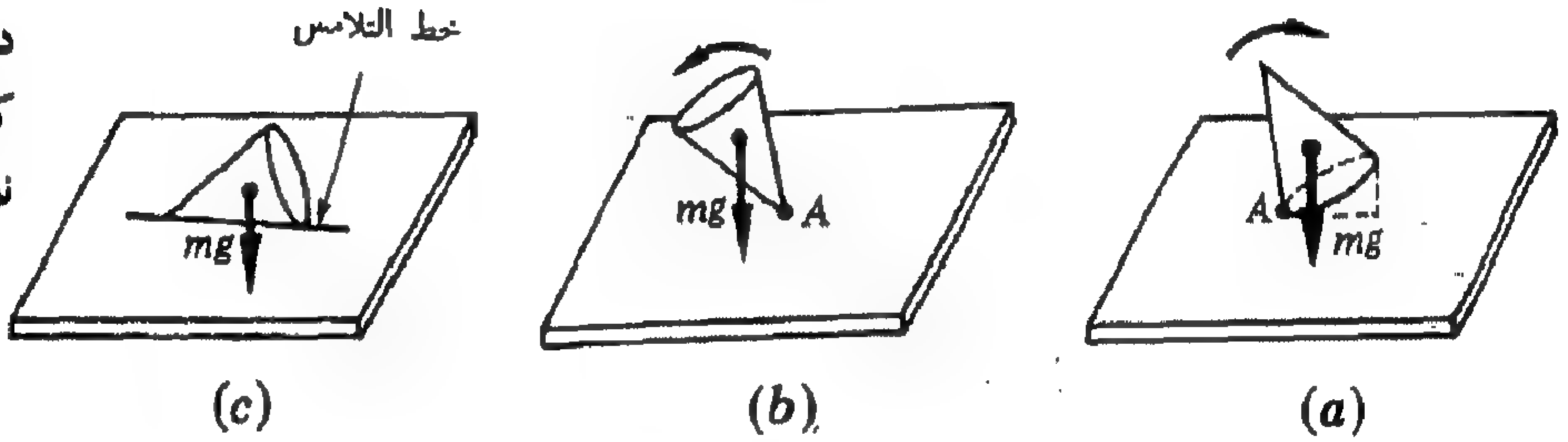


٨ - ٥ التوازن المستقر و المتعادل وغير المستقر

كما رأينا مما سبق يوجد الجسم الجاسيء في حالة توازن اذا تحقق الشرطان $\Sigma F = 0$ و $\Sigma \tau = 0$. ومع ذلك هناك ثلاثة انواع من التوازن الاستاتي وهي الميينة في الشكل ٨ - ١٣. ومن الواضح كيف سمي الاتزان المستقر وغير المستقر بهذين الاسمين. فإذا أملنا المخروط المستقر قليلا عن الوضع الميّن ثم تركناه فإنه سوف يعود الى هذا الوضع. ولكن اذا أملنا المخروط غير المستقر قليلا فإنه سوف يقع. أما الحالة الثالثة، حالة الاتزان المتعادل، فإنها تتميز بأن الجسم لايفضل وضعاً معيناً على الأوضاع الأخرى.

شكل (٨ - ١٤)

يسبب وزن الجسم عزم دوران حول نقطة التلامس كمحور. ويحدد هذا العزم نوع التوازن الموجود.



يقال أن الجسم في حالة توازن مستقر بالنسبة الى اضطراب صغير اذا تعريف عاد الجسم الى حالته غير المضطربة بعد زوال سبب الاضطراب. فمثلا، لنفرض أن المخروط الميّن في الشكل ٨ - ١٤. أقد تعرض لاضطراب طفيف. وإذا حرر الجسم فإنه سوف يعود الى وضعه الأصلي. وتنشأ هذه العودة نتيجة لعزم الدوران الناتج من الوزن mg حول نقطة التلامس A . ويجب أن نلاحظ هنا أن مركز ثقل الجسم قد ارتفع أثناء الاضطراب نتيجة لذلك تكون طاقة وضع الجسم في الوضع المستقر أقل منها في الوضع المضطرب.

يقال أن الجسم في حالة توازن غير مستقر بالنسبة الى اضطراب صغير تعريف اذا سبب الجسم نفسه زيادة الاضطراب بعد زوال سبب الاضطراب. فمثلا، يستمر المخروط الميّن في الشكل ٨ - ١٤ ب في الوقوع اذا حرر ويجذب

الجسم نتيجة لعزم الدوران الذى يسببه الوزن mg حول نقطة التلامس A . علاوة على ذلك يجب أن نلاحظ أن الاضطراب يخفض مركز الثقل ويسبب نقص طاقة وضع الجسم فى الجزء ب .

تعريف يقال أن الجسم فى حالة توازن متعادل اذا كان الجسم محايدا بالنسبة للإضطراب . فمثلا ، يستمر الجسم المئين فى ج فى أى وضع يدحرج إليه . وفى هذه الحالة يكون عزم الدوران الناتج من القوة mg حول نقطة التلامس كمحور صفرا ، لأن خط القوة يمر بخط التلامس . بالإضافة الى ذلك فإن هذا النوع من الاضطراب لايسبب أى رفع أو خفض لمركز ثقل الجسم ، وبناء على ذلك فإن الاضطراب لايسبب أى تغير فى طاقة وضع الجسم .

وهذا المثال الفيزيائى المحدد ليس المثال الوحيد . فجميع الاجسام الجاسئة تتصرف بطريقة مشابهة . يمكننا اذن أن نضع الصيغة التالية فيما يتعلق بالتوازن الاستائى،

التوازن الاستائى توازن الجسم قد يكون (١) مستقرا ، أو (٢) غير مستقر ، أو (٣) متعادلا اذا كان الاضطراب الصغير يسبب (١) زيادة ، أو (٢) نقص ، أو (٣) لايسبب تغير طاقة وضع الجسم .

وفى الحقيقة فإننا سوف نرى أن هذه العبارة تنطبق على الأنواع الأخرى لطاقة الوضع بالإضافة الى طاقة الوضع الثقالية .

٨ - ٦ تشابهات أخرى بين الحركة الخطية والحركة الدورانية

يعلم أى شخص ادار فى وقت ما عجلة حول محورها أن للعجلة خاصية ترتبط ارتباطا وثيقا بالقصور الذاتى . وحقيقة أن للجسم قصورا ذاتيا يجعل من الضرورى علينا أن نسلط على الجسم قوة معينة إذا أريد وضعه فى حالة الحركة . بالمثل ، إذا أريد إيقاف جسم متحرك يلزم أن نؤثر عليه بقوة معينة لكى يصل الى حالة السكون . وهذه الأدلة على وجود القصور الذاتى فى الحركة الخطية يمكن أن نجدها بسهولة فى حالة دوران جسم حول محور .

فمثلا ، تستمر ريشة المروحة الدائرة فى الدوران لفترة معينة بعد إيقاف موتور المروحة . وإذا حاول شخص إيقاف الريشة بإصبعه فإنه قد يجد أن القصور الذاتى الدورانى للريشة كافيا لأن يؤذى أصبعه . من الواضح ايضا أن ريشة المروحة تقاوم بدء دورانها لأن الموتور يحتاج بضع ثوان لكى يسبب تسارع المروحة . وتوجد هذه الأدلة على القصور الذاتى بدرجة أقل أو أكبر فى جميع الأجسام الدوارة .

وجدنا فى الفصول السابقة أن القوة اللازمة للتغلب على تأثيرات القصور الذاتى ولتحريك الجسم حركة خطية تعطى بقانون نيوتن الثانى :

$$F = ma$$

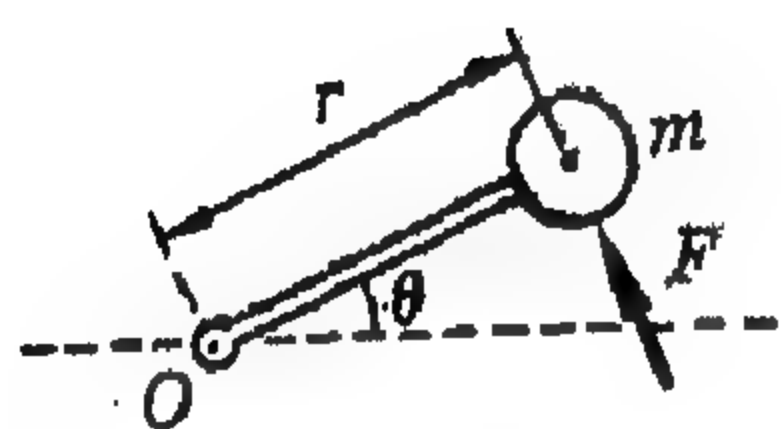
رأينا كذلك في الفصل الأخير أن هناك نظيرا دورانيا منطقيا لكل من معادلات الحركة الخطية . ومن الواضح أن التسارع الخطي a في قانون نيوتن يجب أن يبدل بالتسارع الزاوي α في الحركة الدورانية . وحيث أن عزم الدوران هو الذي يسبب دوران الجسم ، يمكننا أن نخمن أن القوة غير المتزنة F يجب أن تستبدل بعزم الدوران غير المتزن T . وسوف نرى في جزء لاحق أن هذا صحيح .

وبالرغم من ذلك فإن من غير الواضح تماما بماذا يجب أن تستبدل الكتلة m لكي نحصل على الصورة الدورانية لقانون نيوتن . وسوف نرى حالا أنها يجب أن تستبدل بكمية تسمى عزم القصور الذاتي . ويجب أن تعتمد هذه الكمية على الكتلة لأننا نعلم جميعا أنه من الصعب أن نسبب دوران الكتل الكبيرة عن الكتل الصغيرة . ومع ذلك فإننا سوف نرى أن الشكل الهندسي للجسم ذو أهمية كبيرة أيضا .

وفي النهاية يجب أن نشير الى أن سرعة مركز كتلة عجلة تدور حول محور ساكن تساوى صفرا ، ولهذا فإن العجلة لا تملك أى طاقة حركة انتقالية . كذلك فإنها لا تملك أى كمية تحرك انتقالية . علاوة على ذلك فإننا نعلم أن الحدافة يمكنها أن تبذل شغلا بسبب دورانها . فمثلا يمكنها أن تلف حبلا يحمل ثقلا معلقا فيه . أى أن للحدافة طاقة حركة . وفي الاجزاء التالية من هذا الفصل سنوجد تعبيرا لطاقة الحركة الدورانية وتعبيرا لكمية التحرك الدورانى لجسم دوار .

٨ - ٧ العلاقة بين عزم الدوران والتسارع الزاوي :

يمثل الشكل ٨ - ١٥ كتلة كبيرة نسبيا m مثبتة في محور عند O بواسطة قضيب خفيف جدا . لنفرض أن كرسى التحميل عند نقطة الدوران O لاحتكاكي ، ولنفرض ايضا أن كتلة القضيب مهملة . لنعتبر أن النظام موجود في مستوى افقى بحيث لا تسبب الجاذبية أى عزم دوران حول نقطة الدوران .



شکل (۸ - ۱۵)

تسبب القوة F عزم دوران
حول المحور O وتعطى الكتلة
 m تسارعا زاويا حول نقطة
الدوران .

واضح من الرسم أن القوة F المؤثرة على الكتلة m لاتضادها أية قوة أخرى نظرا لعدم وجود احتكاك في محور الارتكاز . أى أنها قوة غير مترنة مؤثرة على m ، لذلك فإنها تسبب تسارع الكتلة حسب العلاقة

$$F = ma$$

ومع ذلك فإن هذه القوة تسبب دوران الكتلة حول نقطة الدوران أثناء ذلك
وحيث أننا قد رأينا في الفصل السابق التسارع الخطي a يرتبط بالتسارع الزاوي
 α بالعلاقة :

$$\alpha r = a$$

فإن

$$F = mra$$

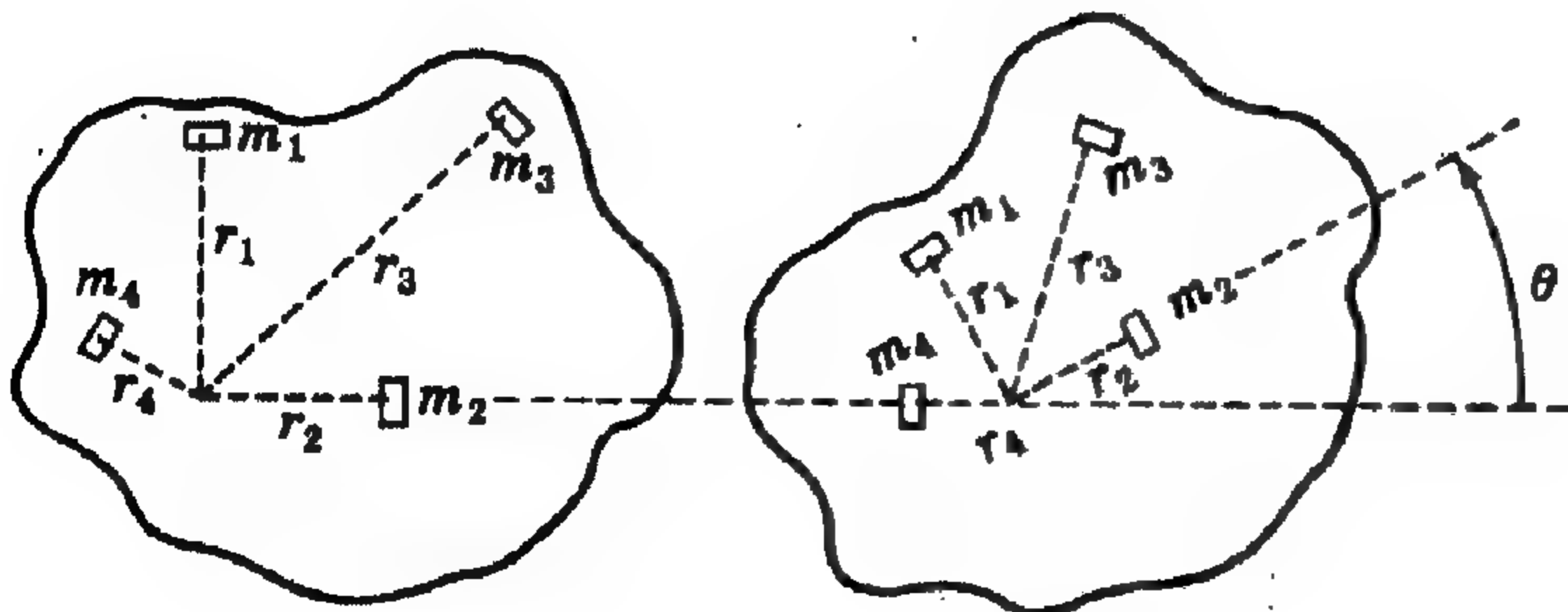
لاحظ أن العلاقة بين α و a صحيحة في المقياس النصف قطري فقط ، ولذلك فإن الزوايا يجب أن تكون مقاسة بالزاوية النصف قطرية عند استخدام المعادلة .

وإذا لم تكون القوة F في الشكل ٨ - ١٥ عمودية على القضيب فإن مركبة F المؤثرة على الكتلة في الاتجاه العمودي على القضيب هي فقط التي ستسبب دوران الجسم . وما هذه إلا طريقة أخرى للقول بأن الدوران ينشأ نتيجة لعزم الدوران ، لأن عزم الدوران هو حاصل ضرب القوة في ذراع رافعتها . إذن من المستحسن أن نكتب معادلات الدوران بدلالة عزم الدوران . ويمكننا عمل ذلك بضرب طرفي المعادلة الأخيرة في r لأن عزم الدوران هو Fr . إذن :

$$\text{حيث } \alpha \text{ مقاسة بالوحدات } Fr = \tau = \text{عزم الدوران} = mr^2\alpha \quad (٨ - ٥)$$

المعادلة (٨ - ٥) هي صورة لنظير معادلة نيوتن $F = ma$ وكما توقعنا : استبدلت F بعزم الدوران المؤثر على النظام τ ، واستبدال التسارع الخطي a بالتسارع الزاوي α . وبدلاً من m ظهرت لدينا ما يسمى عزم القصور الذاتي للنظام ، mr^2 . لاحظ أن القصور الذاتي الدوراني للنظام لا يعتمد على m فقط ولكن على r كذلك . وسوف نتكلم عن ذلك بتفصيل أكبر فيما بعد .

وعملياً تكون كتلة معظم الاجسام الجاسئة موزعة على قيم مختلفة كثيرة للبعد r عن نقطة الارتكاز ، وهذا مبين في الشكل ٨ - ١٦ . ويمكننا تحويل المعادلة (٨ - ٥) بسهولة لتنطبق على هذه الحالة أيضاً . وينحصر التغير الوحيد في تقسيم الجسم الجاسئ الى أجزاء صغيرة على أنصاف أقطار مختلفة وكتابة المعادلة (٨ - ٥) لكل كتلة على حدة .



(أ)

(ب)

شكل (٨ - ١٦)
تقع جميع الكتل الصغيرة التي تتكون منها كتلة الجسم الجاسئ الكبير تحت تأثير نفس التسارع الزاوي حول نقطة الدوران .

يوضح الشكل ٨ - ١٦ عددا من القطع الصغيرة التي تتكون منها كتلة الجسم وينشأ عزم الدوران حول محور الارتكاز ، والذي يؤثر على الكتلة الأولى ، نتيجة لجميع القوى المؤثرة على تلك الكتلة ، سواء كانت قوى خارجية بالنسبة للجسم أو ناتجة من الكتل القريبة من الكتلة الأولى . لتسمى عزم الدوران هذا τ_1 . بتطبيق المعادلة (٨ - ٥) على هذه الكتلة نجد أن :

$$\tau_1 = m_1 r_1^2 \alpha_1$$

حيث r_1 مبينة في الشكل . ويمكن كتابة معادلة مماثلة لأي كتلة في الجسم . لنكتب مجموع هذه المعادلات :

$$(٨ - ١٦) \quad \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_N = m_1 r_1^2 \alpha_1 + m_2 r_2^2 \alpha_2 + \dots + m_N r_N^2 \alpha_N$$

حيث افترضنا أن عدد الكتل التي تكون الجسم هو N . ويمكن كتابة هذه المعادلة بصورة مختصرة بتحويل المعادلة (٨ - ١٦) كما يلي :

$$(٨ - ١٦) \quad \sum_{i=1}^N \tau_i = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \alpha_i$$

حيث يعنى الرمز $\sum_{i=1}^N$ أن نأخذ مجموع الحدود . وللحصول على الحد الأول تستبدل i بالرقم ١ . وفي الحد الثانى تستبدل i بالرقم ٢ ... الخ . وفي النهاية يستنتج الحد الأخير باستبدال i بالرقم N . وحيث أن الجسم الذى ندرسه جسم جاسىء ، فإن كل كتلة فيه تدور حول المحور فى نفس الوقت . وكما هو موضح فى الشكل ٨ - ١٦ ب ، تدور كل كتلة بنفس الزاوية عندما يدور الجسم . وهكذا فإن السرعة الزاوية والتسارع الزاوى لابد أن يكونا ثابتين لجميع الكتل . بناء على ذلك تكون كل من قيم α_i فى المعادلة (٨ - ١٦) مساوية للقيم الأخرى وبالتالي يمكن أخذها كعامل مشترك لنحصل على :

$$(٨ - ١٦) \quad \sum_{i=1}^N \tau_i = \alpha \sum_{i=1}^N m_i r_i^2$$

لندرس الآن معنى الطرف الأيسر للمعادلة (٨ - ١٦) . يمثل هذا الطرف فى الواقع مجموع جميع عزوم الدوران المؤثرة على الكتل المنفصلة . ولكى نعبر عنه بدلالة عزم الدوران الذى تؤثر به القوى الخارجية على الجسم ككل ، اعتبر الحقيقة التالية : إذا أردنا ألا يدور الجسم على الإطلاق تحت تأثير عزوم الدوران الخارجية يمكننا أن نمنع الجسم من الدوران باحدى طريقتين . يمكننا أن نؤثر على الجسم بعزم دوران

مساو في المقدار ومضاد في الاتجاه لكي نلاشى عزم الدوران الخارجى الأسمى . ويمكننا أن نؤثر على كل من الكتل بعزم دوران صغيرة بحيث تلاشى تماما عزم الدوران المنفصلة المؤثرة عليها . نرى اذن أن عزم الدوران الخارجى المؤثر على الجسم ككل يكافئ عددا من عزم الدوران الصغيرة مقداره N تؤثر على الكتل المنفصلة التى يتكون منها الجسم . من هذا ينتج أن الطرف الايسر للمعادلة (٨ - ٦) يكافئ عزم الدوران الخارجى τ المؤثر على الجسم . يمكننا اذن أن نكتب المعادلة (٨ - ٦) فى الصورة :

$$\tau = \alpha \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \quad (٨ - ٦)$$

تعريف من المعتاد تعريف الكمية I ، عزم القصور الذاتى للجسم ، كمايلي

$$I \equiv \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \quad (٨ - ٧) \quad \begin{array}{l} \text{عزم القصور} \\ \text{الذاتى} \end{array}$$

وبالتعويض من المعادلة السابقة فى المعادلة (٨ - ٦) نجد أن :

$$\tau = I\alpha \quad (٨ - ٨)$$

هذه المعادلة هى النظر الدورانى للعلاقة $F = ma$ فى حالة الأجسام الجاسئة الممتدة . ونحن نرى أن عزم الدوران يحل محل القوة وأن التسارع الزاوى يحل محل التسارع الخطى . أما تأثير القصور الذاتى الذى يقابل الكتلة فهو موجود فى عزم القصور الذاتى I . ولكى نرى معنى عزم القصور الذاتى بطريقة أوضح ، لنكتب المعادلة (٨ - ٧) مرة أخرى فى حالة خاصة . لنفرض أن الجسم قد قسم الى أجزاء متساوية الكتلة بحيث كانت كل كتلة منها m_i . اذن تتحول المعادلة (٨ - ٧) الى الصورة :

$$I = mr_1^2 + mr_2^2 + mr_3^2 + \dots + mr_N^2$$

$$I = m(r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + \dots + r_N^2) \quad \text{أو } \dots$$

ويمكن كتابة المعادلة الأخيرة على الصورة :

$$I = Nm \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + \dots + r_N^2}{N}$$

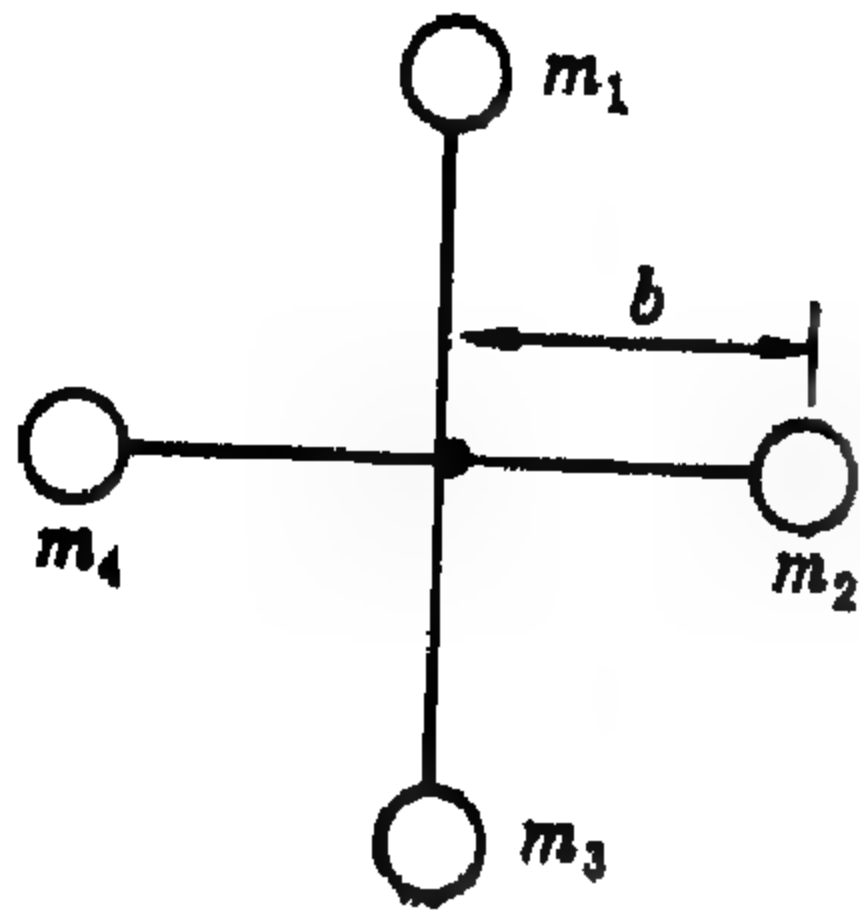
نصف قطر ولكن حيث أن Nm هى الكتلة الكلية للجسم M ، فإن الحد الثانى هو القيمة الحركة المتوسطة لقيم r^2 المختلفة للكتل التى تكون الجسم . ويرمز لمتوسط مربع نصف القطر هذا التدويمية بالرمز K^2 ، وسنسمى K نصف قطر الحركة التدويمية للجسم . والمقدار K^2 هو

المقياس المتوسط لمربع المسافة من نقطة الدوران الى الأجزاء المختلفة من المادة التي تكون الجسم . وبالرموز :

$$I = MK^2$$

ونحن نرى من تعريف I أنه مقياس للقصور الذاتي الدوراني للجسم . كذلك فإن القصور الذاتي الدوراني للجسم يتناسب مع كتلته ويتناسب أيضا مع متوسط مربع المسافة من محور الارتكاز الى أجزاء الكتلة التي تكون الجسم .

٨ - ٨ عزم القصور الذاتي لبعض الأجسام








شكل (٨ - ١٧)

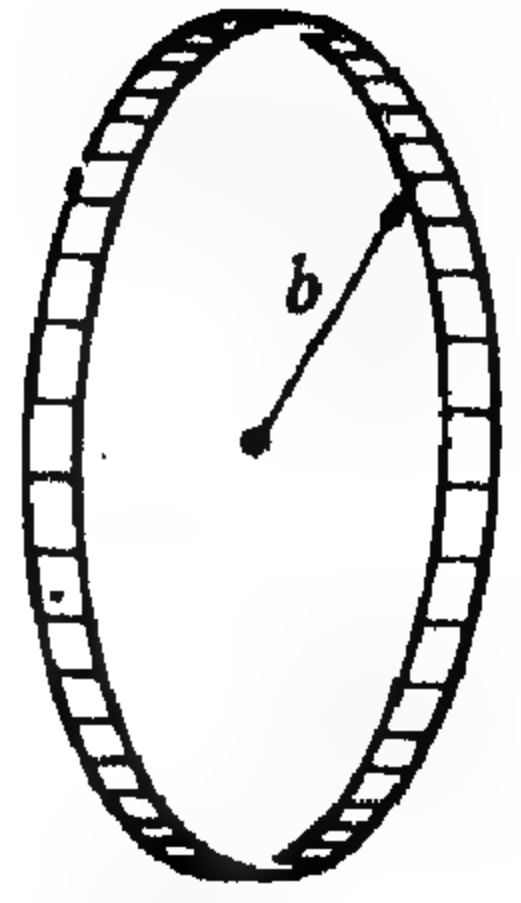
نصف قطر الحركة الترددية لهذا الجسم بالنسبة لمحور يقع في المركز هو b مباشرة . حجم الكرات مبالغ فيه .

علمنا من الجزء السابق أن عزم القصور الذاتي لجسم هو حاصل ضرب كتلة الجسم في مربع بعد معين لهذه الكتلة عن نقطة الدوران أو المحور . ويمكن إيجاد هذه المسافة ، أي نصف قطر الحركة الترددية ، بسهولة في حالات معينة . فمثلا ، تمثل الكتل الأربع المركبة على إطار جاسيء عديم الوزن ، والمبينة في الشكل ٨ - ١٧ ، موقفا بسيطا للغاية . وحيث أن $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = b$ فإن متوسط المسافة بين نقطة الدوران الموجودة في المركز وأجزاء الكتلة المختلفة هو b مباشرة . وعليه فإن I لهذا الجهاز يساوي Mb^2 ، حيث M هي مجموع الكتل m_1 ، m_2 ، m_3 ، m_4 .

جدول ٨ - ١
عزم القصور الذاتي لبعض الأجسام

الجسم (المحور كما هو موضح)	نصف قطر الحركة الترددية K	I
طوق		mb^2
قرص مصمت		$\frac{1}{2}mb^2$
كرة مصمتة		$\frac{2}{5}mb^2$
اسطوانة مصمتة (نصف قطرها b)		$\frac{1}{2}mb^2$
اسطوانة مصمتة (رقيقة) (طولها L)		$\frac{1}{12}mL^2$

ويمثل الطوق أو الطارة حالة هامة أخرى ، وهي مبينة في الشكل ٨ - ١٨ .
لاحظ مرة أخرى أن الكتلة كلها تقع على مسافة قدرها b من نقطة الدوران . وإذا
كانت m هي كتلة الطوق فإن I ستكون mb^2 .

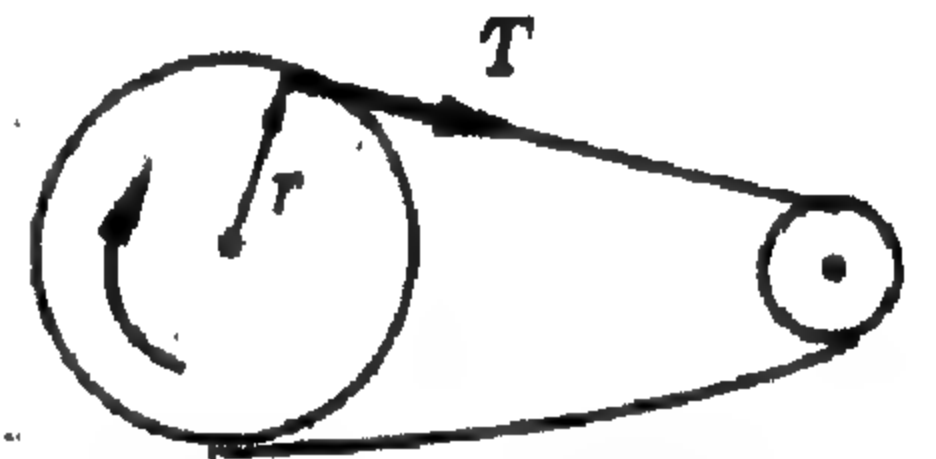


شكل (٨ - ١٨)
نصف قطر الحركة التدويمية
للطوق حول محورها يساوي
نصف قطر الطوق .

هناك حالات أخرى بسيطة للغاية يمكن فيها إيجاد I بدون صعوبة كبيرة ، ويوضح
الجدول ٨ - ١ بعضاً من هذه الحالات . لاحظ في هذا الشأن أن نصف قطر الحركة
التدويمية K هو بالفعل مقياس متوسط بعد الكتلة عن المحور ، أو نقطة الدوران . في
حالة الطوق الرقيق يكون $K = b$ لأن الكتلة كلها تقع على بعد b من المحور . ومع
ذلك فإن K أقل من b في حالة القرص ، لأن الكتلة الخارجية فقط هي التي تبعد عن
المحور مسافة قدرها b . وفي هذه الحالة يكون $K = b/\sqrt{2}$.

وحدات I هي وحدات الكتلة مضروبة في مربع وحدات المسافة . لهذا فإنها
ستكون سـلج - قدم مربع أو كيلوجرام - متر مربع . الخ . وأيضاً يجب أن نوضح
مرة أخرى أن استخدام العلاقة $a = r\alpha$ في اشتقاق المعادلة (٨ - ٨) يحدد
الوحدات المستخدمة في هذه المعادلة . لذلك فإن التسارع الزاوي α يجب أن يكون
مقاساً بالزاوية النصف قطرية في الثانية في الثانية .

مثال توضيحي ٨ - ١٠ : يمثل الشكل ٨ - ١٩ عجلة كبيرة كتلتها 80 kg
ونصف قطرها 25 cm ونصف قطر الحركة التدويمية لها 20 cm . وتدار هذه العجلة
بواسطة السير المبين بالشكل تحركه بكرة صغيرة على موتور . أوجد الشد في السير ،
اللازم لكي يسبب تسارع العجلة بانتظام الى سرعة قدرها 2.0 rev/s في زمن قدره
 20 s .



شكل (٨ - ١٩)
ينقل التسارع الزاوي للعجلة
الكبيرة بواسطة عزم الدوران
الناتج من الشد T في السير
العلوي .

طريقة الحل : قبل أن نستطيع تطبيق العلاقة $\tau = I\alpha$. يجب علينا أن نوجد α من
مسألة الحركة . المعطيات :

$$\omega_0 = 0 \quad t = 20 \text{ s}$$

$$\omega_f = 2.0 \text{ rev/s} = 4\pi \text{ rad/s}$$

نستخدم العلاقة :

$$\omega_f = \omega_0 + \alpha t$$

$$4\pi \text{ rad/s} = (20 \text{ s})(\alpha) \quad \alpha = \frac{\pi}{5} \text{ rad/s}^2$$

(لاحظ أننا قد حولنا الكميات الى المقياس النصف قطري بحيث يكون α مقاساً
بالوحدات المناسبة لمعادلة عزم الدوران) .

والآن نحن في حاجة الى معرفة I ، وهو ببساطة mK^2 ، حيث K نصف قطر
الحركة التدويمية . إذن تتحول العلاقة $\tau = I\alpha$ الى :

$$\tau = (80 \text{ kg})(0.20 \text{ m})^2(0.20\pi \text{ rad/s}^2) = 0.64\pi \text{ N} \cdot \text{m}$$

ولكن عزم الدوران هو القوة مضروبة في ذراع الرافعة . وواضح من الرسم أن القوة هي الشد T في السير ، وذراع الرافعة هو نصف قطر العجلة . إذن :

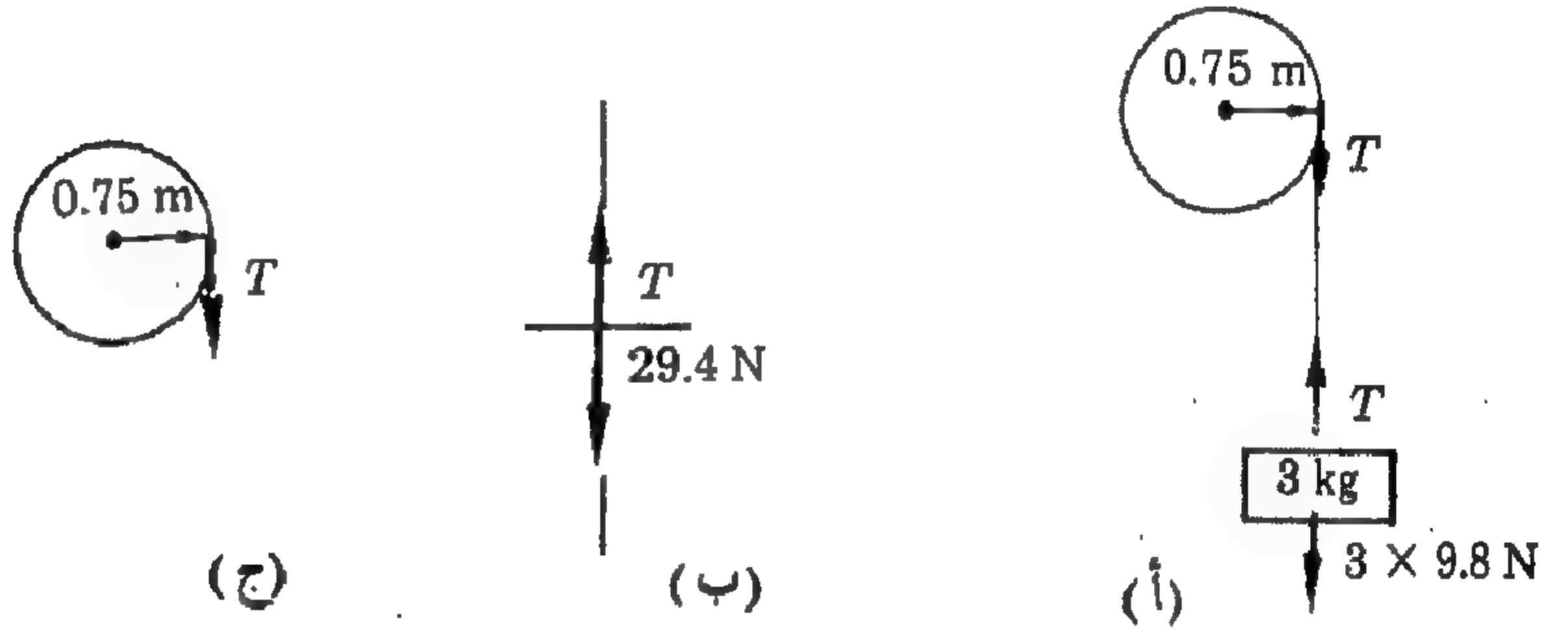
$$\tau = (T)(0.25 \text{ m})$$

ومنه :

$$T = 2.56\pi \text{ N} \approx 8.0 \text{ N}$$

مثال توضيحي ٨ - ١٩ : علق جسم كتلته 3 kg في حبل ملفوف على عجلة كتلتها 40 kg كما هو موضح في الشكل ٨ - ٢٠ . وكان نصف القطر الفعلي للعجلة هو 0.75 m ونصف قطر الحركة الترددية لها 0.60 m . اوجد (أ) التسارع الزاوي للعجلة ، (ب) المسافة التي يسقطها الثقل في أول 10 s بعد تحريره . لاحظ أن وزن جسم كتلته 3 kg هو $3 \times 9.8 \text{ N}$.

شكل (٨ - ٢٠)
يتسارع الجسم الذي كتلته 3 kg تحت تأثير جذب الجاذبية وينقل الشد في الحبل التسارع الزاوي إلى العجلة .



طريقة الحل : نحل المسائل التي تتضمن جسمين بعزل كل منها تباعا . (أ) القوة غير المتزنة المؤثرة على الجسم المعلق في الحبل هي $T - 29.4$ كما هو واضح من الشكل ٨ - ٢٠ ب . باستخدام قانون نيوتن $F = ma$ نجد أن :

$$29.4 - T = 3a \quad (٨ - ٩)$$

وبعزل العجلة كما في الجزء جـ من الشكل نجد أن :

$$\tau = I\alpha$$

$$T(0.75) = (40)(0.60)^2\alpha$$

$$T = 19.2\alpha \quad (٨ - ١٠) \quad \text{أو :}$$

الفكرة العامة هي أن نحل هاتين المعادلتين ، (٨ - ١٠) و (٨ - ٩) آنيا . ولتحقيق ذلك نستخدم حقيقة أن $a = r\alpha$ ، التي تعطى في هذه الحالة $a = 0.75\alpha$. عندئذ تتحول المعادلة (٨ - ٩) إلى :

$$29.4 - T = 2.25\alpha$$

وبالتعويض من المعادلة (٨ - ١٠) نحصل على

$$29.4 = 21.45\alpha$$

ومنه

$$\alpha = 1.37 \text{ rad/s}^2$$

ويجب على الطالب أن يستخدم الوحدات في الحل ليتأكد من صحة وحدات الإجابة .

(ب) تستخدم معادلات الحركة الخطية المعروفة مع حقيقة أن :

$$a = r\alpha \approx 1.03 \text{ m/s}^2$$

المعطيات:

$$a = 1.03 \text{ m/s}^2 \quad v_0 = 0 \quad t = 10 \text{ s}$$

وباستخدام العلاقة :

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

نحصل على :

$$s \approx 51.5 \text{ m}$$

وإذا كانت المسافة مقاسة سابقا ومعروفة يمكننا أن نعكس الطريقة ونحسب عزم القصور الذاتي للعجلة . ويستخدم هذه النوع من التجارب أحيانا لتعيين عزوم القصور الذاتي وأنصاف أقطار الحركة التدويمية .

٨ - ٩ طاقة الحركة الدورانية

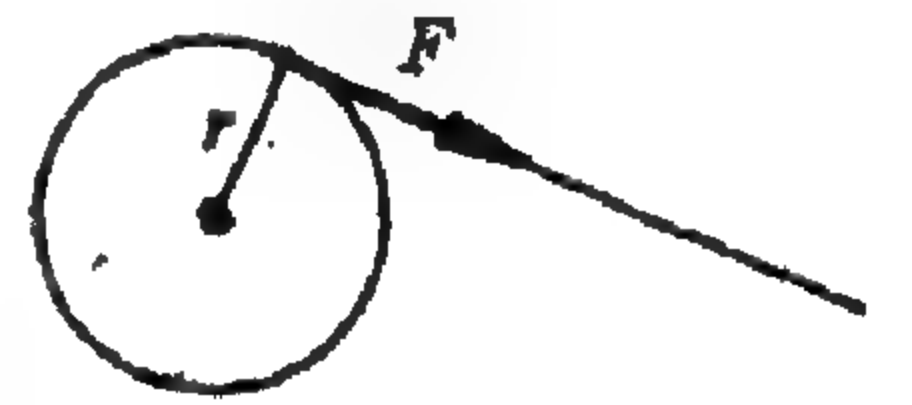
اعتبر تجربة يستخدم فيها حبل ملفوف حول عجلة لتعجيل عجلة من السكون ، وهذا الموقف مبين في الشكل ٨ - ٢١ ، حيث رمزنا للشد في الحبل بالرمز F . السؤال الآن هو : ماهو الشغل الذي يبذله شخص يجذب الحبل الى أسفل على العجلة عندما تدار العجلة .

إذا جذب الحبل الى الخارج مسافة قدرها s ، من الواضح أن الشغل المبذول على العجلة سيكون :

$$Fs = \text{الشغل المبذول} \quad (٨ - ١١)$$

لايجاد s يجب علينا أن نعي أولا زاوية دوران العجلة خلال زمن تسليط القوة F . من الضروري إذن حساب التسارع الزاوي α من العلاقة :

$$\tau = I\alpha$$



شكل (٨ - ٢١)

عندما يجذب الشخص الحبل بقوة قدرها F فإنه يبذل شغلا أثناء ذلك الحبل . وهذا الشغل يؤدي الى زيادة طاقة الحركة الدورانية للعجلة .

وبالتعويض عن عزم الدوران بالمقدار Fr نحصل على :

$$Fr = I\alpha \quad \text{أو} \quad \alpha = \frac{Fr}{I}$$

والآن ، بحل مسألة الحركة الدورانية لإيجاد الزاوية التي دارتها العجلة θ ، نجد أن :

$$2\alpha\theta = \omega_f^2 - \omega_0^2$$

وبعد التعويض عن α نحصل على :

$$2\frac{Fr}{I}\theta = \omega_f^2 - 0$$

$$\theta = \frac{\omega_f^2 I}{2Fr} \quad \text{أو :}$$

وحيث أن $r\theta = s$ ، يمكننا أن نستبدل المعادلة (٨ - ١١) بالمعادلة :

$$\frac{1}{2}I\omega_f^2 = \text{الشغل المبذول}$$

وهذه علاقة غاية في الأهمية . وهي تنص على أن كمية الشغل التي بذلت على العجلة قد تحولت الى طاقة دورانية للعجلة مقدارها $\frac{1}{2}I\omega^2$. تعرف طاقة الحركة الدورانية للعجلة بأنها $\frac{1}{2}I\omega^2$

طاقة الحركة الكلية لجسم يتحرك بحركة انتقالية وحركة دورانية في نفس الوقت هي $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$. ويجب أن يكون عزم القصور الذاتي حول مركز الكتلة وأن تكون v هي سرعة مركز الكتلة .

لدينا إذن العلاقتان التاليتان لطاقة الحركة ، واحدة لطاقة الحركة الانتقالية والأخرى لطاقة الحركة الدورانية .

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv^2 &= \text{طاقة الحركة الانتقالية} \\ \frac{1}{2}I\omega^2 &= \text{طاقة الحركة الدورانية} \end{aligned} \quad (٨ - ١٢)$$

ونحن نرى مرة أخرى أن السرعة الخطية v قد حلت محلها السرعة الزاوية ω . بالإضافة الى ذلك ، استنتجت معادلة طاقة الحركة الدورانية باستبدال الكتلة m بعزم القصور الذاتي I .

من هذا نرى أن طاقة الحركة الدورانية وتساوى $\frac{1}{2}I\omega^2$ لجميع الأجسام التي يمكن أن تدور. تنشأ نتيجة للحركة الدورانية للجسم . وكما هو صحيح في حالة طاقة الحركة الانتقالية ، من الممكن أن تتحول طاقة الحركة الدورانية أيضا إلى شغل وطاقة وضع . وسوف نستخدم هذه الحقيقة في المثال التوضيحي التالي .

مثال توضيحي ٨ - ١٢ : تبدأ الكرة المبينة في الشكل ٨ - ٢٢ في التدرج إلى أسفل من السكون من قمة مستوى مائل ارتفاعه h . فإذا كان نصف قطر الكرة r وكتلتها m ، فبأي سرعة تتحرك هذه الكرة عندما تصل إلى القاع (افترض أن تدرجج الكرة أملس وأن فواقد الاحتكاك مهملة) .

طريقة الحل : يحل هذا النوع من المسائل بمتى السهولة باستخدام نظرية الشغل والطاقة . نعلم أن :

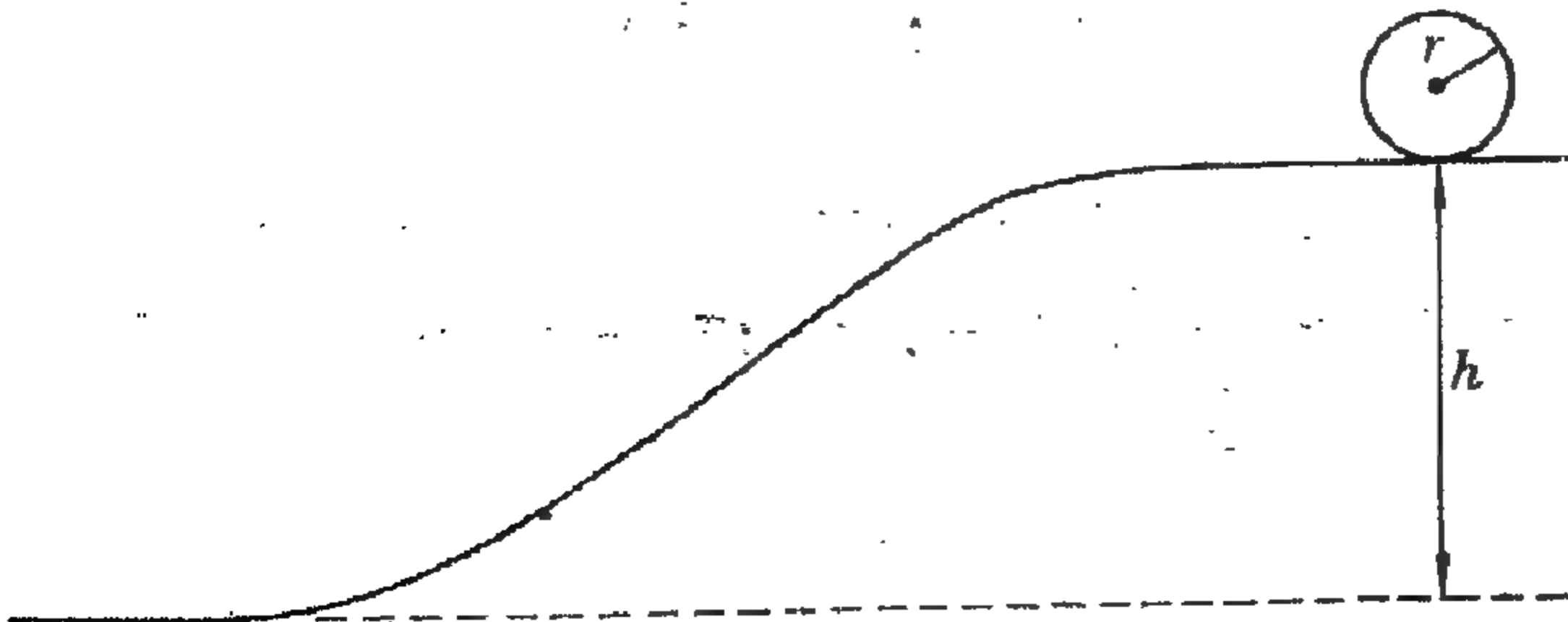
$$\text{طاقة الوضع المفقودة} + \text{طاقة الحركة المفقودة} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

وحيث أن الشغل المبذول في هذه الحالة هو شغل ثيقل ، فإن هذه المعادلة تتحول إلى الصورة :

$$\text{طاقة الوضع المفقودة} + \text{طاقة الحركة الدورانية المفقودة} + \text{طاقة الحركة الانتقالية المفقودة} = 0$$

أى أن

$$(0 - \frac{1}{2}mv^2) + (0 - \frac{1}{2}I\omega^2) + mgh = 0$$



شكل (٨ - ٢٢)
عندما تتدحرج الكرة إلى قاع
التل تتحول طاقة وضعها إلى
طاقة حركة دورانية وطاقة
حركة انتقالية .

حيث v و ω هما السرعتان الخطية والزاوية عند القاع . ولكننا نعلم من الجدول ٨ -
١ أن عزم القصور الذاتي للكرة هو $I = \frac{2}{5}mr^2$ إذن :

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mr^2\omega^2$$

لاحظ أن الكتلة تختصر من الطرفين ، ولهذا فإنها ليست مهمة في هذه الحالة .

وإذا تذكرنا أن $v = r\omega$ ، يمكننا أن نجد مباشرة أن :

$$gh = \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}v^2$$

ويحل هذه المعادلة بالنسبة إلى v نحصل على :

$$v = \sqrt{\frac{10gh}{7}}$$

من المهم أيضا أن نلاحظ أن نصف قطر الكرة يختصر أيضا . علاوة على ذلك تتحول معظم الطاقة في النهاية إلى طاقة انتقالية كما نرى من العلاقة الأولى المعطاة
عاليه :

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + (\frac{1}{2})(\frac{2}{5})(mv^2)$$

وإذا كان الجسم المتدحرج طبقا فإن المعامل $\frac{2}{5}$ سيستبدل بالوحدة ، وفي هذه الحالة ستكون طاقة الحركة الدورانية نصف الطاقة النهائية .

٨ - ١٠ بقاء كمية التحرك الزاوية

بناء على التشابهات الكثيرة بين الظواهر الخطية والدورانية والتي وجدناها حتى الآن ، لا يجب أن ندهش من أن هناك نظيرا دورانيا لكمية التحرك الخطي . وترتبط كمية التحرك الدوراني أو الزاوي بحقيقة أن الجسم الدوار يستمر في الدوران .

وكما هو متوقع من حقيقة أن كمية التحرك الخطي تعطى بالكمية mv ، فإن تعريف
معادلة تعريف كمية التحرك الزاوي يجب أن تكون كالتالي :

$$\text{كمية التحرك الزاوي} = I\omega \quad (٨ - ١٣) \quad \text{كمية التحرك الزاوي}$$

وتتبع كمية التحرك الزاوي لجسم أو مجموعة من الأجسام قانون بقاء يشبه كثيرا قانون بقاء كمية التحرك الخطي . ويمكن صياغة هذا القانون كالتالي :

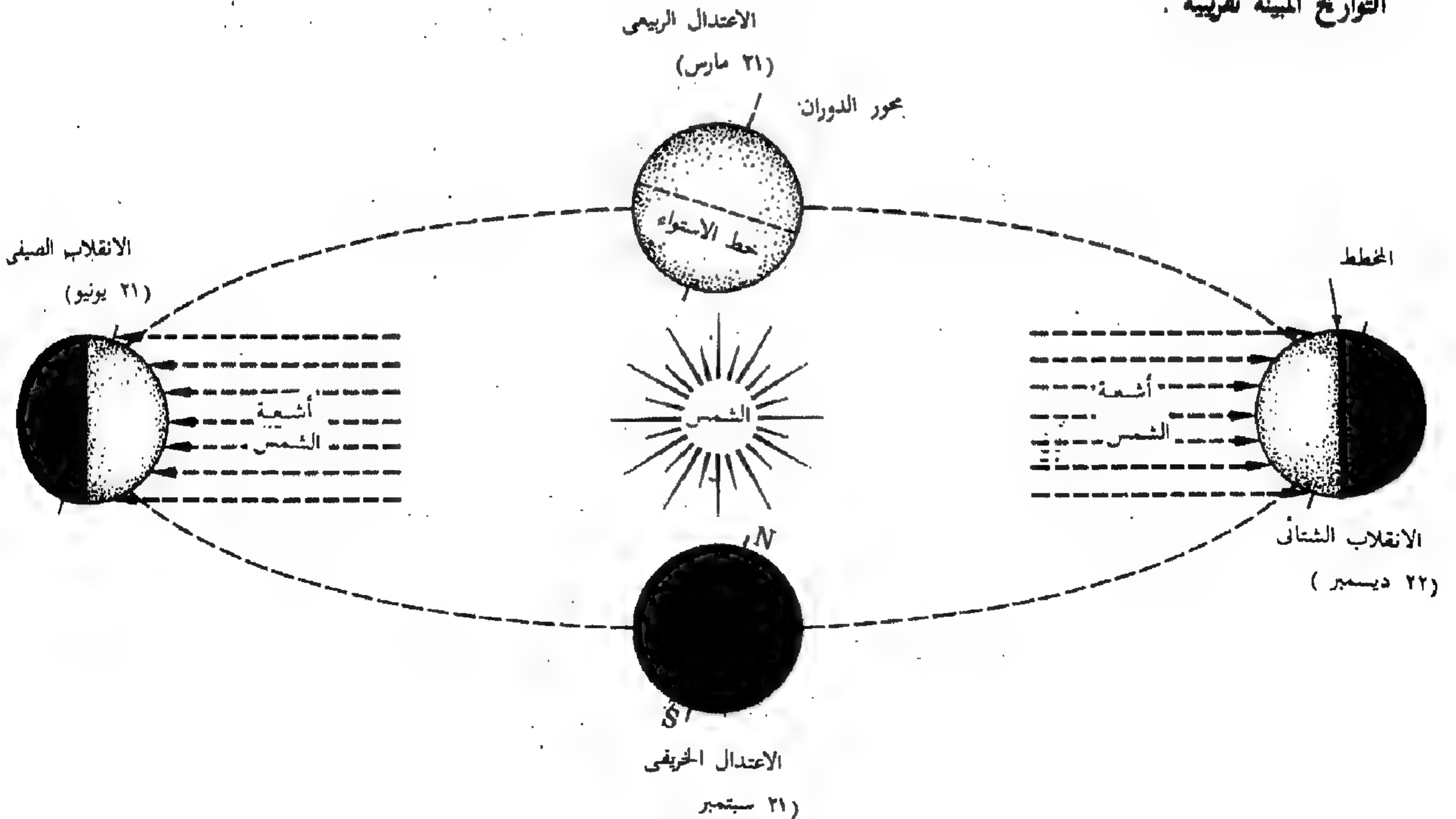
قانون بقاء
كمية التحرك
الزاوي

تظل كمية التحرك الزاوي لجسم أو مجموعة من الأجسام ثابتة ما لم تؤثر عليها عزوم دوران خارجية ، وعندئذ سوف يستمر الجسم أو مجموعة الأجسام في الدوران حول نفس المحور بدون أى تغير .

ويسمى هذا القانون بقانون بقاء كمية التحرك الزاوي . لاحظ أن القانون لا ينص فقط على أن ω ستظل ثابتة للجسم المعزول . ولكنه ينص أيضا على أن اتجاه المحور الذى يدور الجسم حوله يستمر بدون تغيير . ويحكم هذا القانون عمل الجيروسكوبات الموازية والأجهزة المماثلة . فمثلا ، إذا اديرت عجلة كبيرة حول محور شمالي - جنوبي ، فإن العجلة لن تغير إتجاهها بسهولة ما لم تسلط عليها قوى كبيرة جدا . وعندما يسلط عزم دوران على مثل هذا النظام الدوار ، فإن حركة النظام نتيجة لذلك تمثل أهمية خاصة لأنها تبدو معارضة لما يتوقع المرء حدوثه . وبالرغم من أن تحليل هذه الظواهر أكثر تعقيدا من أن نتبعه في هذا المقرر الدراسى ، فإن من السهل توضيح هذه التأثيرات ويمكن للمدرس أن يعطى بعضا منها .

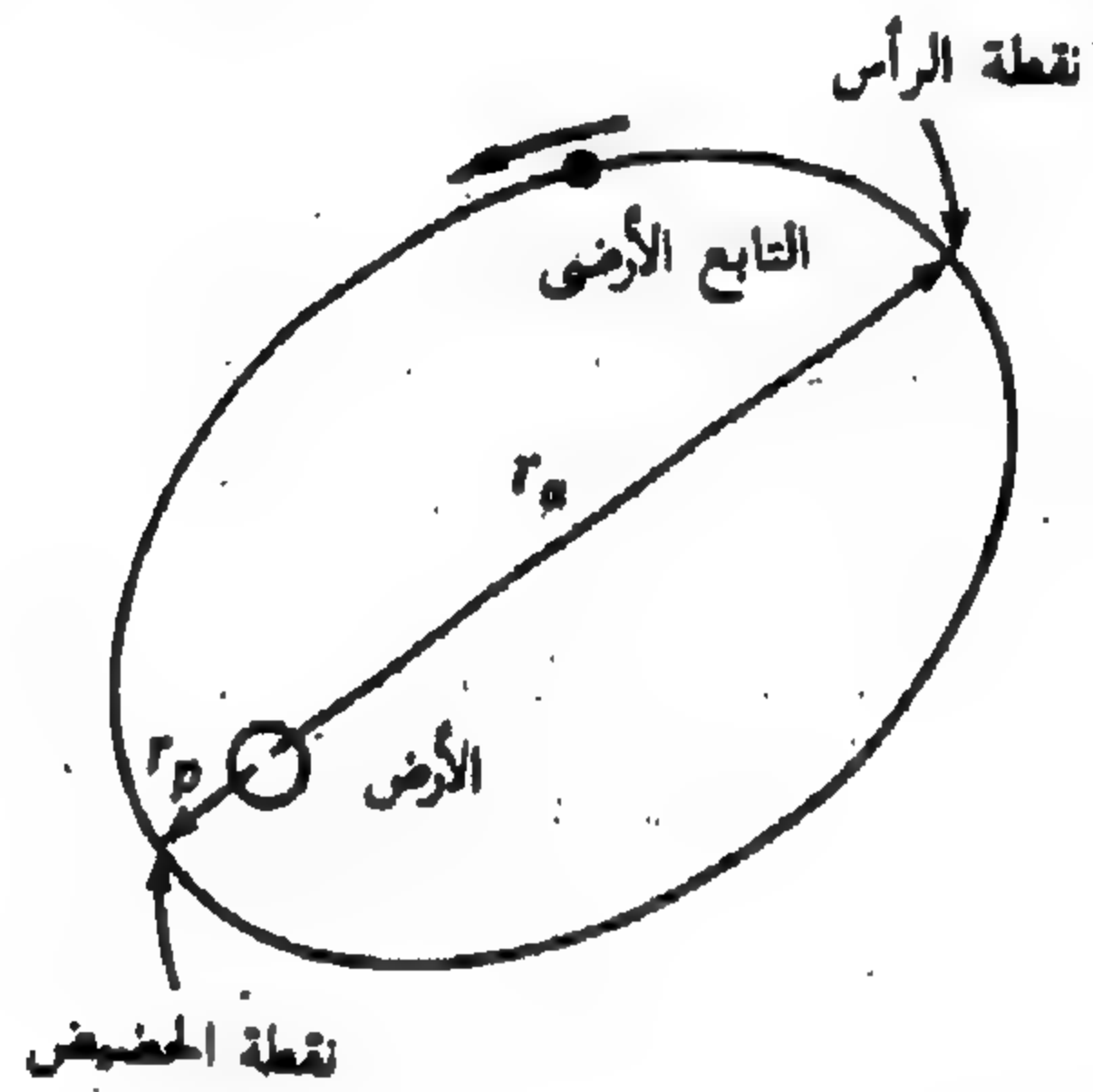
إذن ، لا يغير محور دوران جسم إتجاهه ما لم يجبره عزم دوران خارجى على عمل ذلك . وهذه الحقيقة ذات أهمية كبيرة بالنسبة لدوران الأرض حول الشمس . وفي الحقيقة فإن الأرض تقع تحت تأثير أى عزم دوران محسوس لأن القوة الرئيسية المؤثرة عليها ، وهى جذب الشمس ، هى قوة نصف قطرية . لذلك فإن محور دوران الأرض يظل ثابت الاتجاه بالنسبة للكون المحيط بها . أى بالنسبة للنجوم البعيدة . ويمكننا أن نرى هذا السلوك في الشكل ٨ - ٢٣ .

شكل (٨ - ٢٣)
يحيز احتفاظ محور دوران
الأرض باتجاهه ثابتا بالنسبة
لباق الكون، مثالا لقانون بقاء
كمية التحرك الزاوي .
التواريخ المبينة تقريبية .



لاحظ أن مسار الأرض حول الشمس دائري تقريبا . ولكن محور دوران الأرض ليس عموديا على المستوى الذي يحدده هذا المدار ، ولكنه يصنع زاوية ثابتة مع هذا المدار . ونظرا لبقاء كمية التحرك فإن اتجاه محور الدوران لا يتغير أثناء دوران الأرض حول الشمس . وكما يمكنك أن ترى من الشكل ، يستمر القطب الشمالي للأرض باستمرار في ضوء الشمس طوال الصيف (يوليو) . وفي منتصف الشتاء (يناير) يتواجد القطب الشمالي في ظلام دائم . والطبع فإن العكس صحيح بالنسبة للقطب الجنوبي . وتعتبر الفصول التي نشاهدها نحن مثالا أقل ادهاشا لنفس الظاهرة .

يمكننا أيضا أن نرى أمثلة كثيرة أخرى لبقاء كمية التحرك الزاوي في الكون المحيط بنا . وتستخدم هذه الحقيقة في التنبؤ بدوران الكواكب في مداراتها وحركة النجوم في السماء . وهذا القانون نفسه ذو أهمية كبيرة في تعيين سلوك الذرات في الجزيئات وسلوك الإلكترونات في الذرات . وفي الحقيقة فإن مجال هذا القانون غير محدد ، فهو ينطبق على أصغر الأجسام كما ينطبق على أكبر الأجسام في الكون .



شكل (٨ - ٢٤)
أوجد النسبة بين سرعتي
التابع الأرضي عند نقطة
الحضيض ونقطة الرأس .

مثال توضيحي ٨ - ١٣ : اعتبر التابع الأرضي الذي يدور حول الأرض كما هو مبين في الشكل ٨ - ٢٤ . أوجد النسبة بين سرعتيه عند نقطة الحضيض ونقطة الرأس .
طريقة الحل : يدور التابع حول الأرض في قطع ناقص تقع الأرض في إحدى بؤرتيه . وحيث أن القوة التي تؤثر بها الأرض على التابع قوة نصف قطرية، فإن كمية التحرك الزاوي للتابع حول مركز الأرض كمحور لا بد أن تكون محفوظة . فإذا رمزنا لنقطة الحضيض بالرمز P ولنقطة الرأس بالرمز a فإن قانون بقاء كمية التحرك الزاوي يخبرنا أن :

$$I_P \omega_P = I_a \omega_a$$

ولكن عزم القصور الذاتي لكتلة نقطية m (التابع الأرضي) حول محور دوران يقع على بعد r منها هو mr^2 . إذن تتحول هذه العلاقة الى :

$$mr_p^2\omega_p = mr_a^2\omega_a$$

التي تعطى

$$\frac{\omega_p}{\omega_a} = \left(\frac{r_a}{r_p}\right)^2$$

نعلم أن $v_T = \omega r$. وحيث أن السرعة مماسية عند نقطة الحضيض ونقطة الرأس ، ينتج إذن أن :

$$\frac{v_p/r_p}{v_a/r_a} = \left(\frac{r_a}{r_p}\right)^2$$

التي يمكن تبسيطها الى الصورة :

$$\frac{v_p}{v_a} = \frac{r_a}{r_p}$$

مثال توضيحي ٨ - ١٤ : تدور الأرض حول محورها مرة واحدة في كل يوم . افترض أن الأرض قد انكمشت بطريقة ما بحيث اصبح نصف قطرها مساويا لنصف قيمته في الوقت الحاضر . بأي سرعة سوف تدور الأرض في هذه الحالة ؟

طريقة الحل : لنفرض كتقريب أن الأرض منتظمة الكثافة في كل حالة . عندئذ سوف يتغير عزم القصور الذاتي للأرض من $I_0 = \frac{2}{5}MR_0^2$ الى $I_f = \frac{2}{5}MR_f^2$ ، حيث M هي كتلة الأرض. $R_0 = 2R_f$.

وحيث أنه لا يؤثر أى عزم دوران على الأرض أثناء عملية الانكماش ، فإن كمية التحرك الزاوى يجب أن تكون محفوظة . إذن :

$$I_0\omega_0 = I_f\omega_f$$

حيث $\omega_0 = 1 \text{ rev/day}$ ، ω_f هي سرعة الدوران النهائية . وبالتعويض عن قيمتي I_0 و I_f نجد أن :

$$\frac{2}{5}MR_0^2\omega_0 = \frac{2}{5}M\frac{1}{4}R_0^2\omega_f$$

ومنه نجد أن :

$$\omega_f = 4\omega_0 = 4 \text{ rev/day}$$

أى أن طول اليوم سوف ينقص الى ست ساعات .

ملخص

* مركز ثقل الجسم هو النقطة التي يمكننا اعتبار أن وزن الجسم يؤثر عليها . في جميع الحالات تقريبا يمكننا أن نعتبر أن مركز الثقل ومركز الكتلة متطابقين . من الممكن أن نفترض أن كتلة الجسم بأكملها موجودة في مركز الكتلة عند دراسة انتقال الجسم الذي تسببه قوى خارجية .

* قياس التأثير الدوراني لقوة ما بعزم الدوران τ الناتج عن هذه القوة . عزم الدوران حول محور معين هو القوة مضروبة في ذراع رافعتها . ذراع الرافعة هو طول العمود الساقط من المحور على خط القوة .

* لكي يتحقق توازن الجسم يجب أن يتحقق الشرطان الآتيان :

$$\Sigma \tau = 0 \quad \text{و} \quad \Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$$

عند جمع عزوم الدوران تعتبر عزوم الدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة موجبة وعزوم الدوران في اتجاه عقارب الساعة سالبة . تستخدم طريقة مكونة من خمس خطوات في حل مسائل التوازن ، وقد أعطيت هذه الخطوات الخمس في الجزء ٨ - ٣ .

* عند كتابة معادلة عزم الدوران لموقف توازن، يمكن أن يؤخذ المحور في أي مكان مناسب . يؤخذ المحور عادة بحيث يمر بخط قوة مجهولة خلاله، وهذه الطريقة لن تظهر القوة المجهولة في معادلة عزم الدوران .

يمكن وصف التوازن الإستاتيقي بأنه توازن (١) مستقر ، (٢) غير مستقر ، (٣) متعادل حسب ما إذا كان الإضطراب الصغير ينسب (١) زيادة ، (٢) نقصا ، (٣) لايسبب أي تغير في طاقة وضع الجسم ، على الترتيب .

يسبب عزم الدوران الخارجى تسارعا للجسم طبقا للمعادلة $\tau = I\alpha$ ، تقيس الكمية I القصور الذاتي الدوراني للجسم حول نفس المحور المأخوذ لعزم الدوران . وتسمى هذه الكمية عزم القصور الذاتي للجسم وتعطى بالعلاقة $I = \Sigma m_i r_i^2$ ، أو بدلالة الكتلة الكلية M للجسم $I = MK^2$ ، حيث K نصف قطر الحركة التدويرية . قيم I لبعض الأجسام البسيطة معطاه في الجدول ٨ - ١ .

الجسم الدوار له طاقة حركة دورانية تساوى $\frac{1}{2}I\omega^2$. طاقة الحركة الكلية لجسم يتحرك حركة انتقالية ودورانية في نفس الوقت هي $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$. في هذا التعبير v و I تشيران الى مركز الكتلة .

كمية التحرك الزاوى لجسم دوار هي $I\omega$. ينص قانون بقاء كمية التحرك الزاوى - في غياب عزوم الدوران المؤثرة على النظام - على أن كمية التحرك الزاوى للنظام ثابتة . وهذا لايعنى أن مقدار كمية التحرك الزاوى فقط هي التى تظل ثابتة ، بل أيضا اتجاه محور الدوران .

الحد الأدنى من الاهداف التعليمية :

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

*١ - إيجاد مركز الثقل ومركز الكتلة لجسم بسيط منتظم كالكرة والطوق والقضيب والمكعب ... الخ .

*٢ - اجراء تجربة عملية لإيجاد موضع مركز أى جسم جاسىء بسيط غير منتظم الشكل .

*٣ - إيجاد ذراع الرافعة لقوة معينة بالنسبة الى محور معين .

*٤ - حساب عزم الدوران حول محور معين نتيجة لقوة معينة .

*٥ - صياغة الشرطين اللازمين للتوازن بالألفاظ وفي صورة معادلة رياضية .

*٦ - حل المسائل البسيطة المتعلقة بالتوازن كالأمثلة التى سبق ذكرها في الأمثلة التوضيحية من ٨ - ٤ الى ٨ - ٩ .

*٧ - توضيح ماإذا كان جسم معين في حالة توازن مستقر أو غير مستقر أو متعادل .

٨ - كتابة عزم القصور الذاتي لكتلة نقطية m حول محور يبعد عنها مسافة قدرها r . صياغة كيف ترتبط هذه النتيجة بتعريف عزم القصور الذاتي لجسم معقد بالكلمات .

٩ - إيجاد إحدى الكميات الآتية إذا كان جميع الكميات الأخرى معلومة : K, I, M .

١٠ - كتابة النظر الدوراني للعلاقة $F = ma$ وتعريف كل كمية فيه . استخدام هذه العلاقة لحل مسائل التسارع الدوراني البسيطة كالأمثلة التوضيحية من ٨ - ١٠ و ٨ - ١١ .

١١ - كتابة صيغة طاقة الحركة الدورانية .

١٢ - إيجاد طاقة الحركة الكلية لجسم بمعلومية نصف قطره وسرعته وعزم القصور الذاتي I له .

١٣ - حل المواقف البسيطة المتعلقة بنظرية الشغل والطاقة في حالة الأجسام الدوارة ، وقد أعطينا بعضها منها في المثال التوضيحي ٨ إلى ١١ والمسائل من ١٩ - ٢١ .

١٤ - كتابة قانون بقاء كمية التحرك الزاوي وكتابة صيغة كمية التحرك الزاوي . استخدام هذا القانون في حل المسائل البسيطة كالمعطاه في الأمثلة التوضيحية ٨ - ١٣ و ٨ - ١٤ .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتي :

* مركز الثقل ، مركز الكتلة

* ذراع الرافعة

* عزم الدوران

* الشرط الثاني للتوازن

* موضع المحور اختياري

* أنواع التوازن الاستاتي الثلاث .

عزم القصور الذاتي $I = \sum m_i r_i^2$

نصف قطر الحركة التدويمية $I = MK^2$

$\tau = I\alpha$

طاقة الحركة الدورانية : $\frac{1}{2}I\omega^2$

طاقة الحركة الكلية = طاقة الحركة الدورانية + طاقة الحركة الانتقالية

كمية التحرك الزاوي : $I\omega$

قانون بقاء كمية التحرك الزاوي

امثلة وتلميحات :

* ١ - افترض أن لديك خيطا ومسطرة طولها متر وكتلة قدرها 1 kg وكتلة مجهولة في حدود بضعة كيلوجرامات . كيف يمكنك تعيين الكتلة المجهولة باستخدام أساسيات هذا الفصل ؟

* ٢ - هناك طريقة صحيحة وأخرى خاطئة لرفع ثقل كبير . ارجع الى الشكل ٨ - ١٢ واستخدمه في شرح لماذا تعتبر الطريقة المبنية خاطئة . ماهي الطريقة الصحيحة ؟ اشرح .

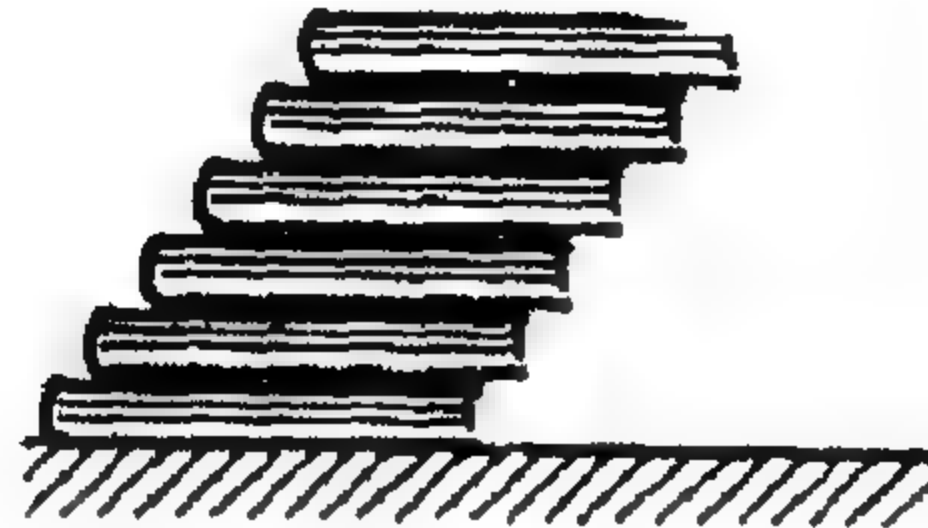
*٣ - باستخدام الرسم التخطيطي والمعطيات المبينة في شكل ٨ - ١٠ ، اشرح لماذا يكون من الأسهل أن تحمل سطلا من الماء في يدك معلقة بجانبك عن أن تحمله في يدك الممتدة أفقيا ؟

*٤ - فف بحيث تكون قدمك ملتصقتان معا وجسمك صلبا وحاول أن تحيل بزاوية قدرها θ على الرأس . لاحظ أن θ يجب أن تكون صغيرة لكي تتمكن من الاحتفاظ بالتزانك . اشرح ماذا يحدد مقدار الزاوية . لماذا يتمكن ذور الأقدام الكبيرة من الميل أكبر من غيرهم ؟

*٥ - يقال أن الأشخاص الرشيقين أقل عرضة لآلام الظهر من البدينين . اشرح كيف يؤثر هذا العامل على وضع الجلسة وانفعال العضلة وماشابه ذلك .

*٦ - وضع عدد كبير من الكتب كل فوق الآخر بإزاحات منتظمة كما هو مبين في الشكل م ٨ - ١ . ناقش شروط توازن هذا الكوم من الكتب أو عدم توازنه .

شكل م ٨ - ١



*٧ - يراد حصاد تل شديد الانحدار باستخدام حصادة مروج يقودها شخص راكب عليها أو جرار . تحت أي الشروط يكون ذلك آمنا ؟ كرر العمل في حالة الهبوط من التل وكرره في حالة القيادة جانبيا على التل . عند الاجابة على هذا السؤال يجب أن تقدر موضع مركز ثقل الحصادة والقائد . لماذا ؟

*٨ - من المعتاد فتح الباب المغلق بوضع سفين خشبي في الشق بالقرب من المفصلة مباشرة . لماذا يؤدي ذلك عادة الى تدمير المفصلة ؟

*٩ - أي عجلتي الدراجة أسهل في إيقاف دورانها حول محورها ، العجلة ذات الاطار المملوء بالهواء أو العجلة ذات الاطار المملوء بالماء ؟

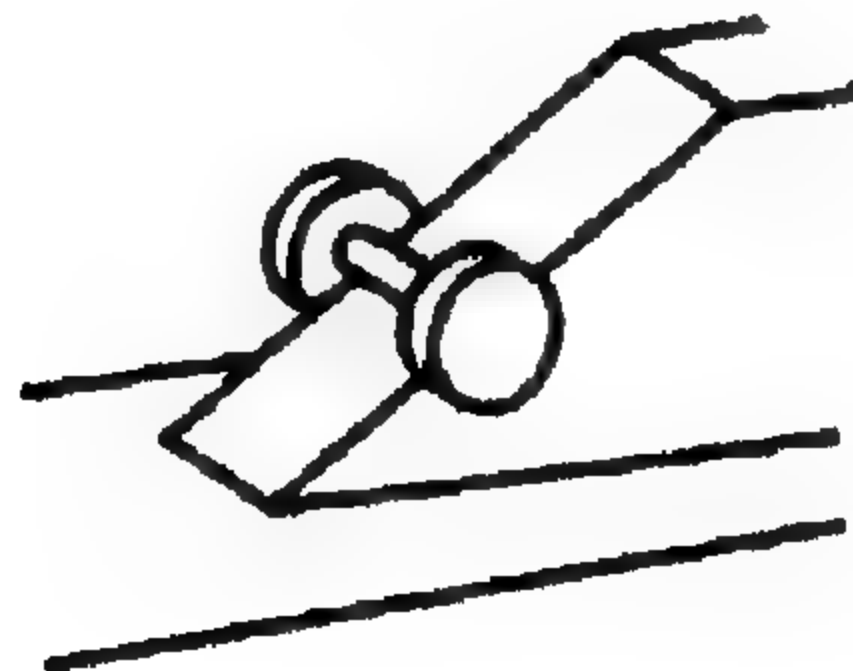
*١٠ - ايهما يتحرك بسرعة أكبر بعد التدرج الى أسفل على نفس المستوى المائل ، الكرة أو الطوق اذا كانت كتلتهما ونصف قطريهما متساويين ؟ اشرح . ناقش حالة طوق وقرص متساويين في الكتلة ونصف القطر .

*١١ - افترض أن جذب الشمس للأرض قد تضاعف فجأة . ماذا يمكنك أن تقول عن معدل دوران الأرض وعن مدارها حول الشمس ؟

*١٢ - افترض أن انفجارا داخليا قد فتح فجأة فجوة ضخمة في الأرض بدفع سطحها الى الخارج . ماتأثير ذلك على دوران الأرض حول محورها وحول الشمس ؟

*١٣ - نصر على أن كمية التحرك الزاوي محفوظة . هل لايتعارض ذلك مع حقيقة أن جميع الاجسام الدوارة تقريبا تبطيء وتتوقف في نهاية الأمر ؟

شكل م ٨ - ٢

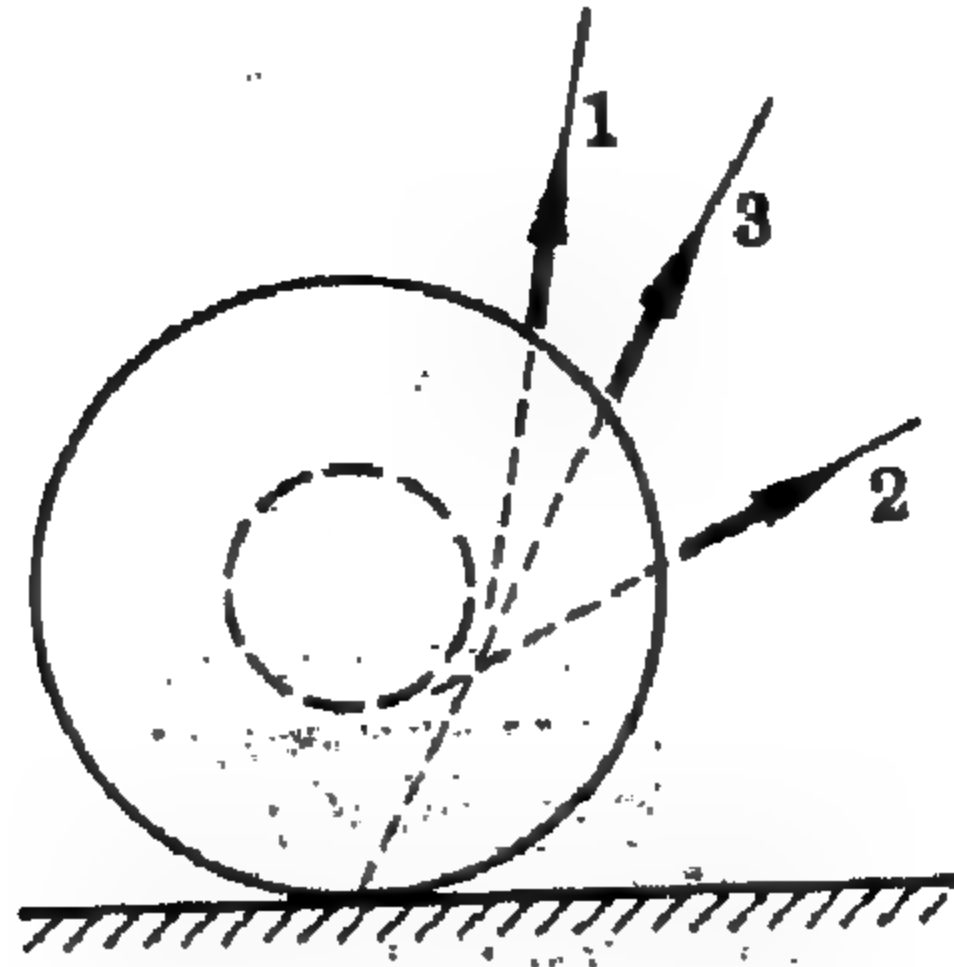


*١٤ - يمثل الشكل م ٨ - ٢ مكبا (ملف نقيط) متدحرجا الى أسفل على مستوى مائل . وبمجرد أن يتلامس القرصان الكبيران الموجودان على جانبي المكب مع الأرضية ينطلق المكب بسرعة انتقالية كبيرة . اشرح لماذا يحدث ذلك موجهها اهتماما خاصا لطريقة توزيع طاقة الحركة .

*١٥ - يتحرك المكب (ملف الخيط) المبين في الشكل م ٨ - ٣ الى اليسار عندما يكون الخيط في الوضع 1 ، ويتحرك الى اليمين عندما يكون الخيط في الوضع 2 لماذا ؟ ماذا يحدث عندما يكون الخيط في الوضع 3 ؟

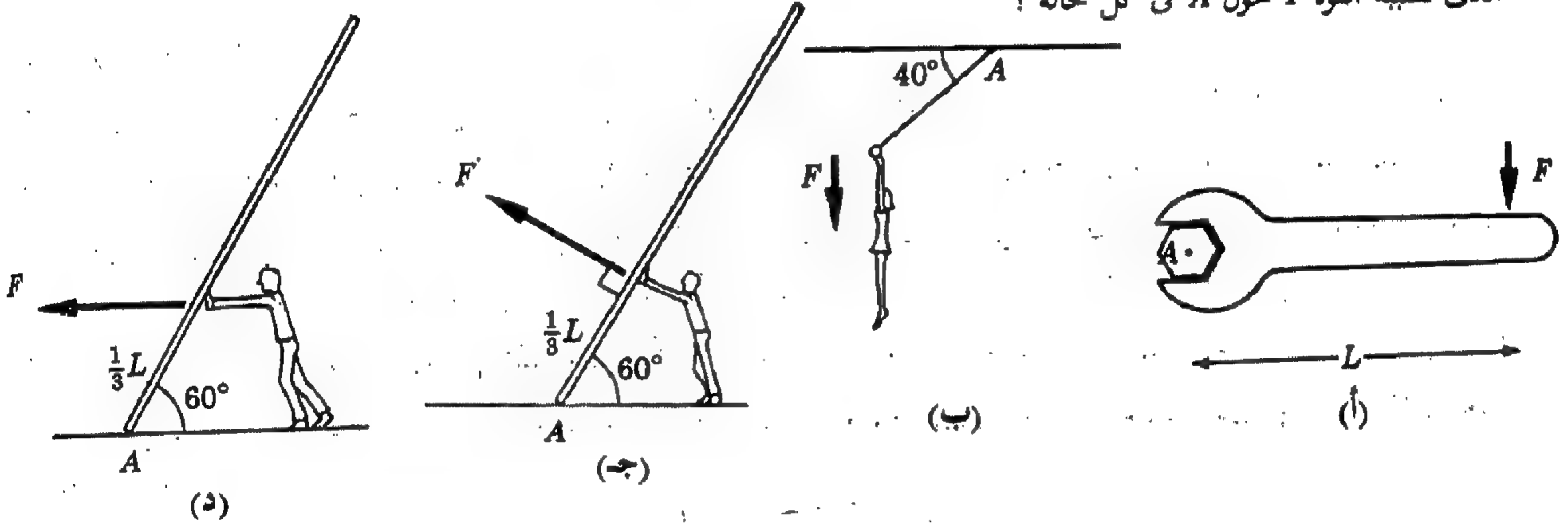
- ١٦ - أى كسر بالتفريب تمثله طاقة الحركة الدورانية لعجلات سيارة تتدحرج الى أسفل على تل من طاقة الحركة الكلية ؟ (ق)
- ١٧ - تتحرك سيارة الى الشرق فى طريق سريع يمتد شرقا وغربا ، وتتسارع السيارة من السكون الى سرعتها القصوى . هل تزيد سرعة دوران الأرض أو تنقص نتيجة لذلك ؟ قدر التغير الجزئى فى سرعة دوران الأرض . (ق)

شكل م ٨ - ٣



مسائل

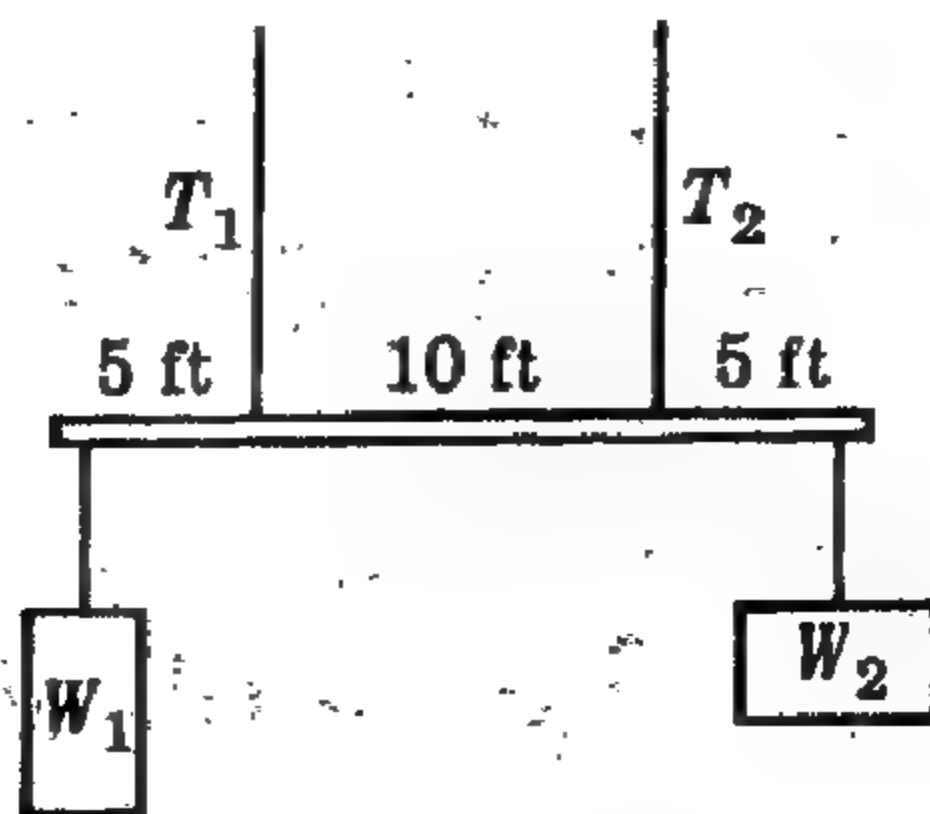
- *١ - أرجع الى الشكل م ٨ - ٤ . (أ) اوجد ذراع الرافعة للقوة F فى كل حالة إذا أخذت النقطة A كمحور . (ب) ماهو عزم الدوران الذى تسببه القوة F حول A فى كل حالة ؟



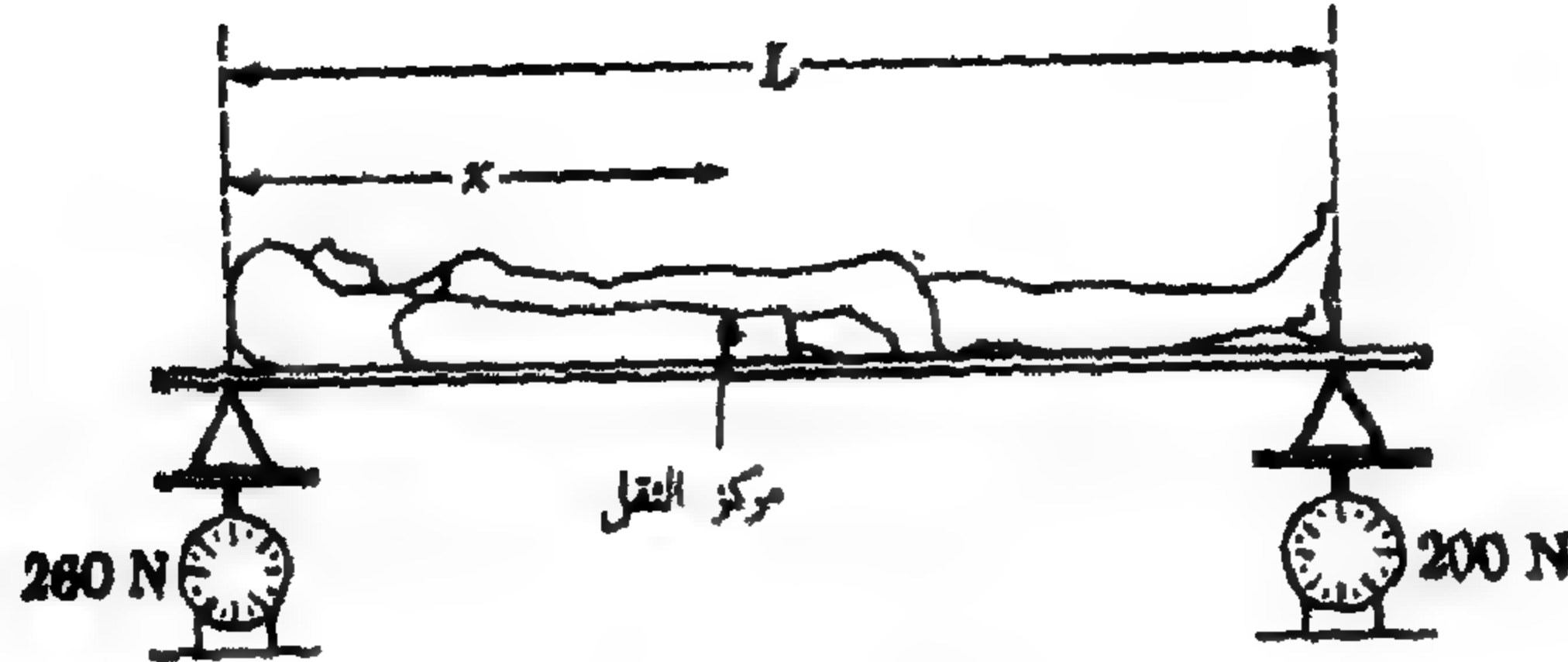
شكل م ٨ - ٤

- ٢ - الحبلان الرأسيان المبينان فى شكل م ٨ - ٥ يحملان لوحا خشبيا ثخينا منتظما وزنه 50 lb والأوزان المبينة . فإذا كانت $T_1 = 80 \text{ lb}$ و $W_2 = 100 \text{ lb}$ ، فأوجد قيمة كل من T_2 ، W_1 .

- *٣ - يحمل الحبلان الرأسيان المبينان فى الشكل م ٨ - ٥ لوحا خشبيا ثخينا منتظما وزنه 50 lb وثقلين كما هو مبين . فإذا كان كل من الحبلين يمكن أن يتحمل شدا قدره 200 lb فقط ، وإذا كان W_2 ضعف W_1 فما هى أكبر قيمة للنقل W_1 ؟ (افترض أن الحبلين اللذين يحملان W_1 و W_2 قويان جدا . تحذير : T_1 لايساوى T_2 : أيهما يساوى 200 lb ؟) .

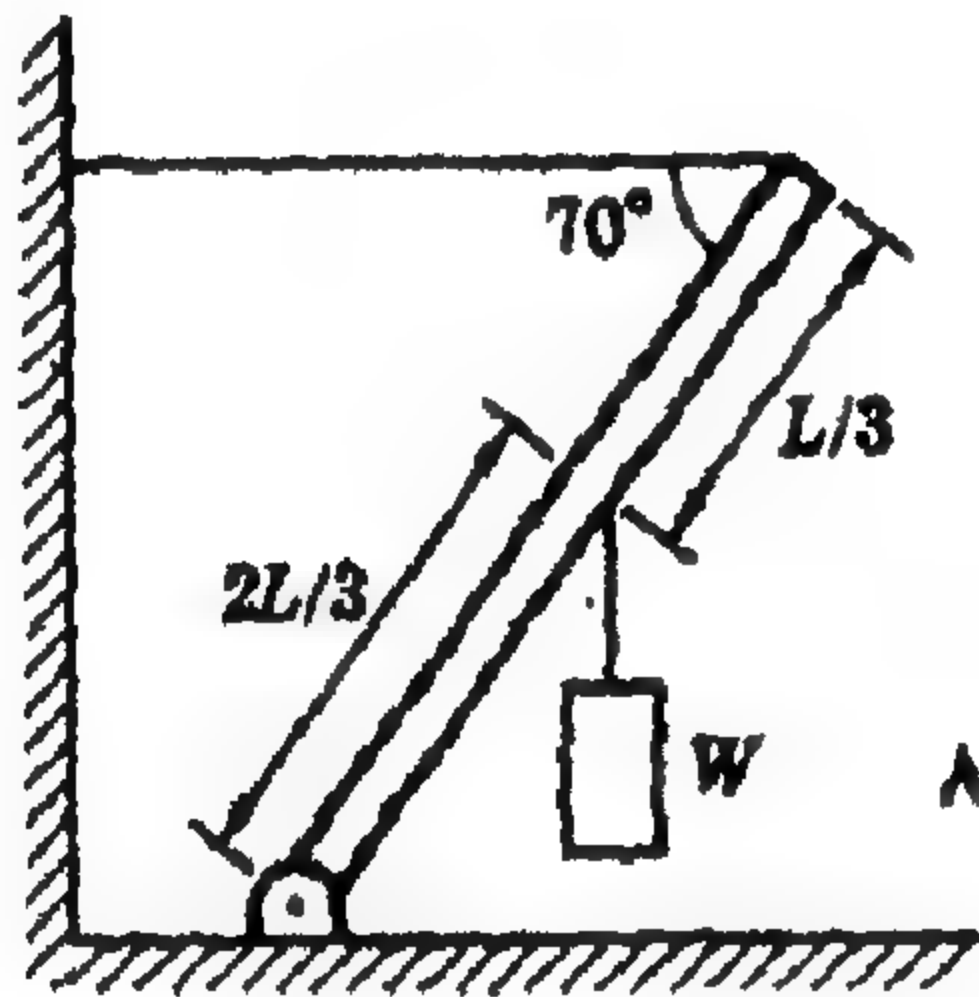


٤ - لتعيين موضع مركز ثقل شخص ما يوضع هذا الشخص على ميزانين كما هو مبين في الشكل م ٨ - ٦ . إفتراض أن قراءة الميزان الأيمن هي 200 N . أوجد المسافة x المبينة في الرسم بدلالة L . إفتراض أن قراءتي الميزانين قد صححتا بطرح قراءتي الميزانين عندما لم تكن السيدة في مكانها .

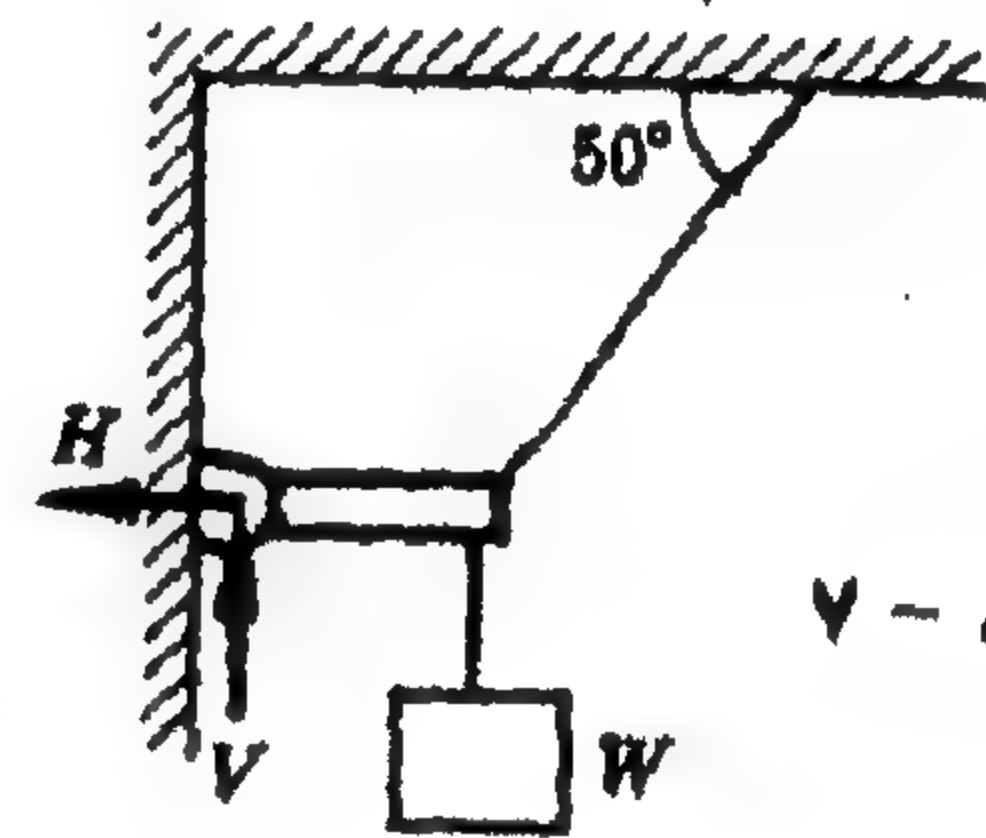


شكل م ٨ - ٦

*٥ - العمود المبين في الشكل م ٨ - ٧ منتظم ووزنه 200 N . يوجد (أ) الشد في الحبل ، (ب) مركبتي القوة H و V التي يؤثر بها الدسار (المسمار) على الحائط إذا كان $W = 800\text{ N}$.



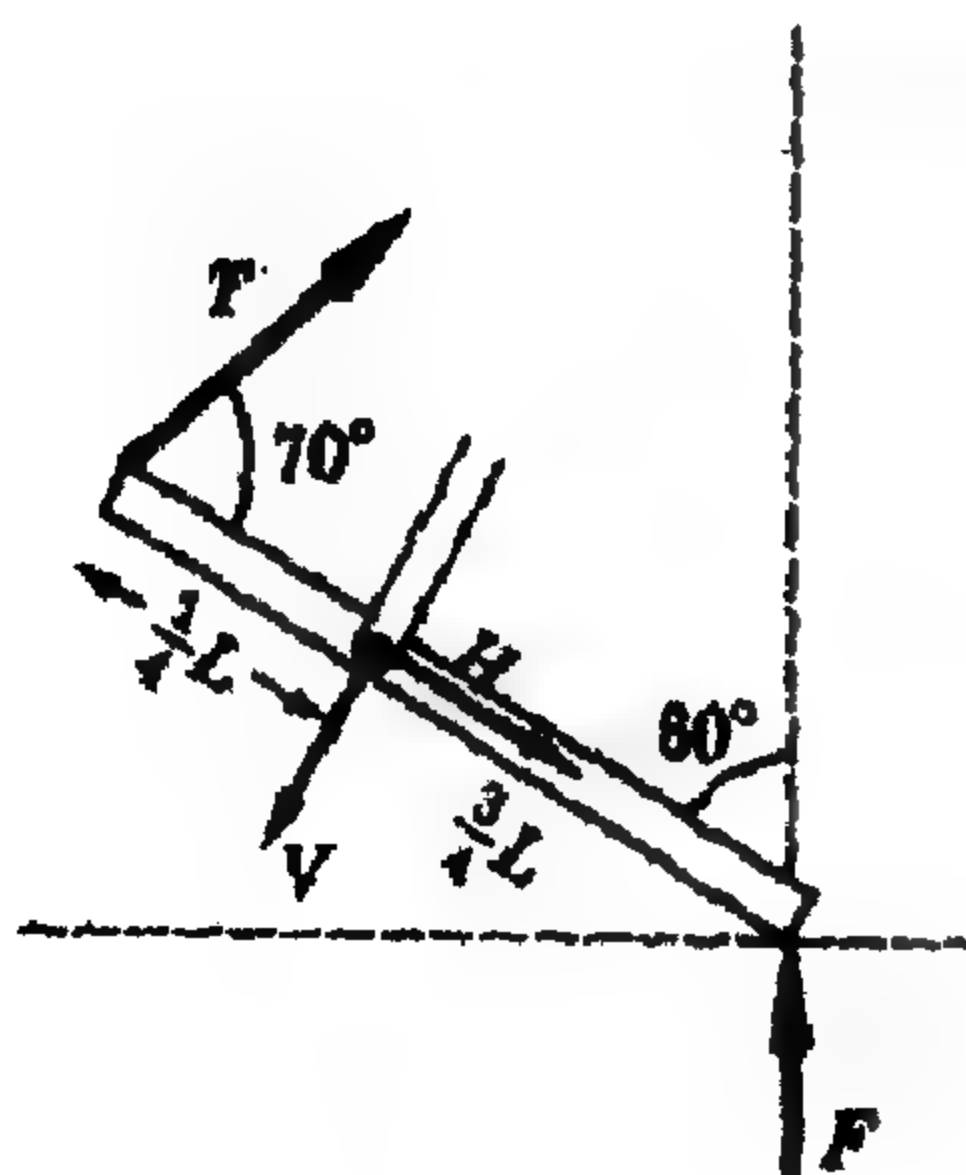
شكل م ٨ - ٨



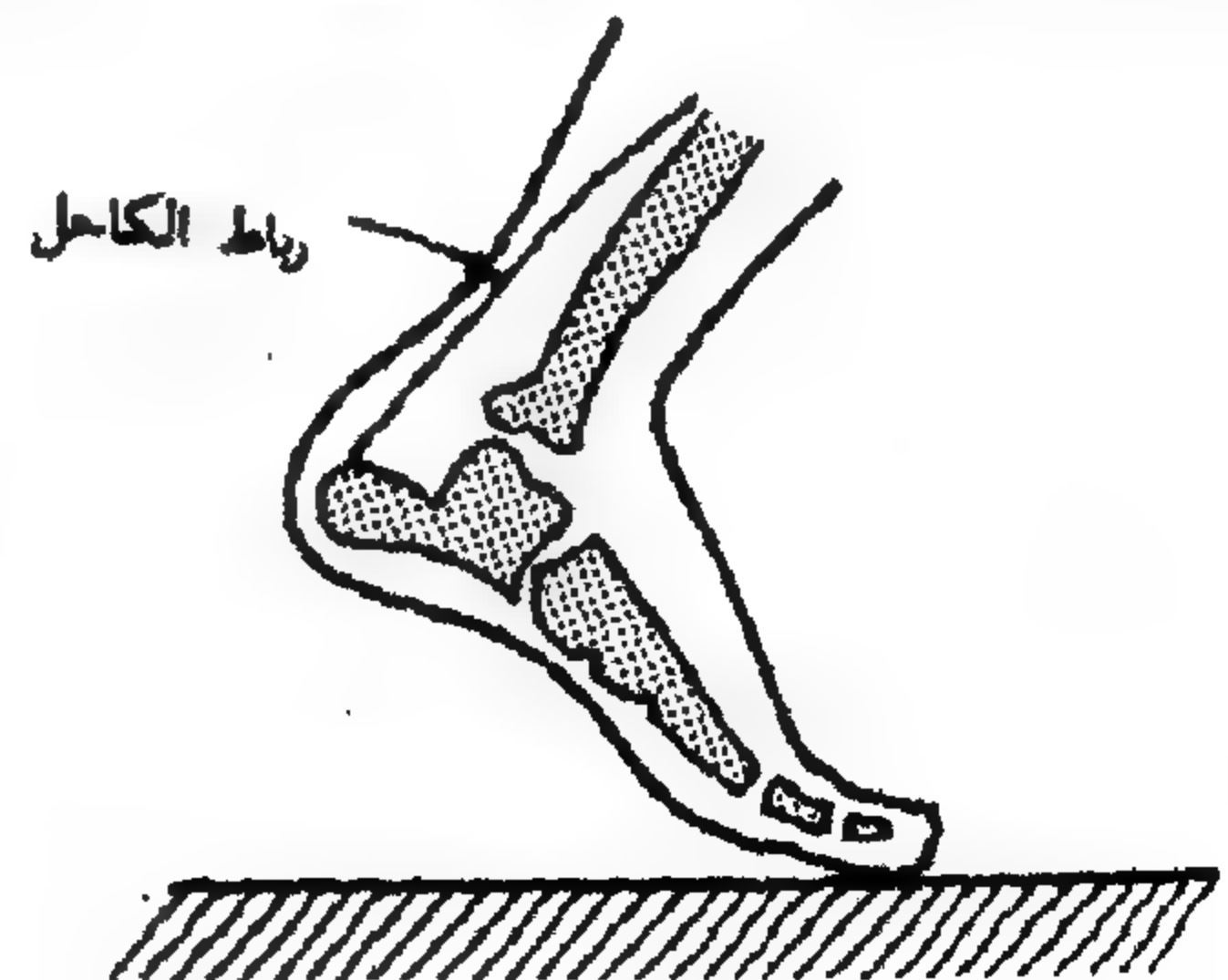
شكل م ٨ - ٧

*٦ - يحمل عمود منتظم وزنه 500 N ثقلا كما هو مبين في الشكل م ٨ - ٨ . (أ) ماهي أكبر قيمة للثقل إذا كان الحبل الأفقي قادرا على حمل 2000 N ؟ (ب) ماهما مركبتا القوة عند قاعدة العمود ؟

*٧ - عندما يقف شخص على رأس إصبع القدم يبدو هذا الموقف شبيها بما هو مبين في الشكل م ٨ - ٩ . ويمكننا استبدال الموقف الحقيقي بالنموذج المبين في الجزء ب . وإذا كان الشخص يقف على قدم واحدة فإن القوة F ، أي الدفع على الأرضية ، مساوية لوزن الشخص . يوجد (أ) الشد في رباط الكاحل ، (ب) H و V عند الكاحل بدلالة F للموقف الموضح .



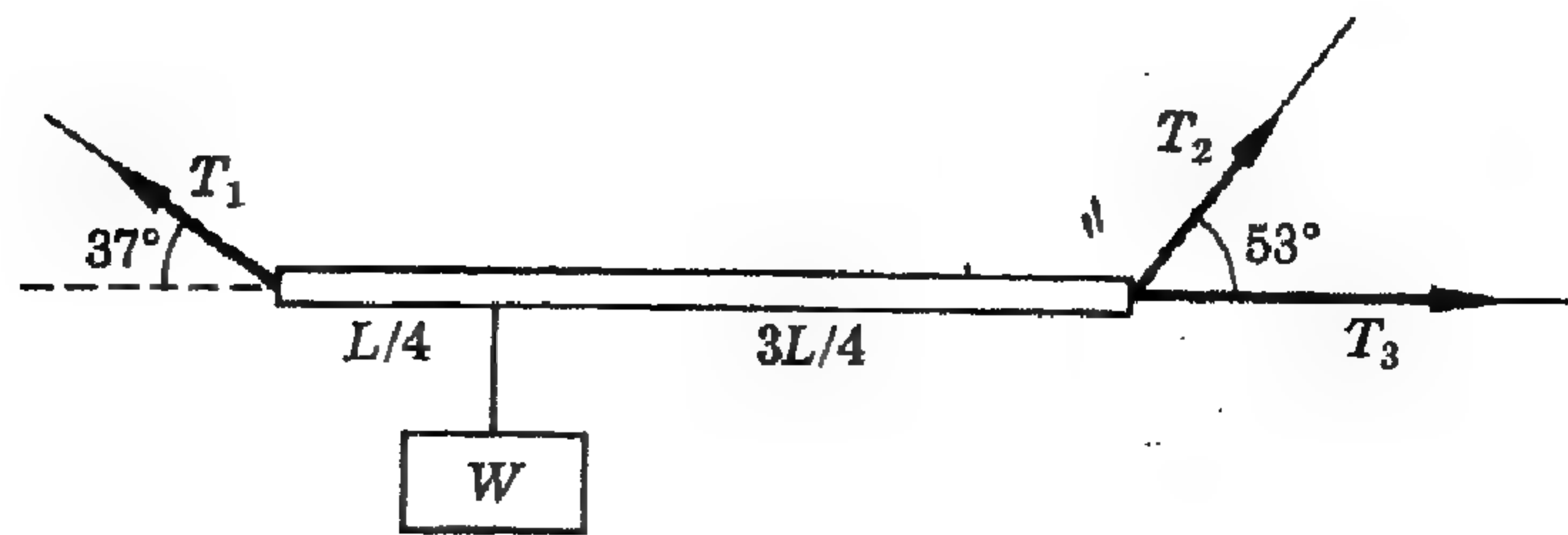
(ب)



(أ)

شكل م ٨ - ٩

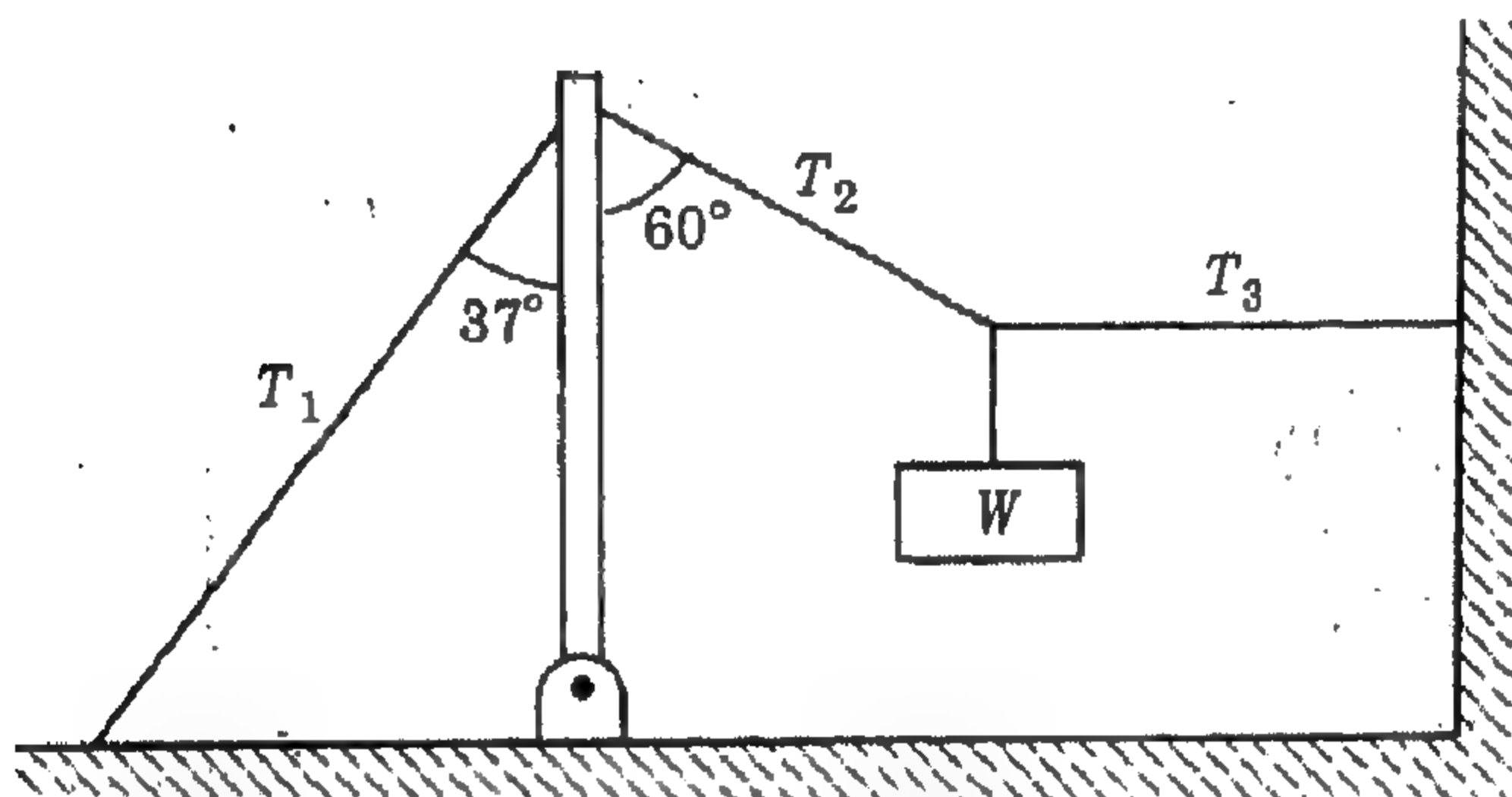
٨* - يحمل لوح خشبي وزنه 120 N ثقلا مقداره $W = 700 \text{ N}$ كما هو مبين في الشكل م ٨ - ١٠. إيجاد الشد في كل من الحبال الثلاثة الحاملة.



شكل م ٨ - ١٠

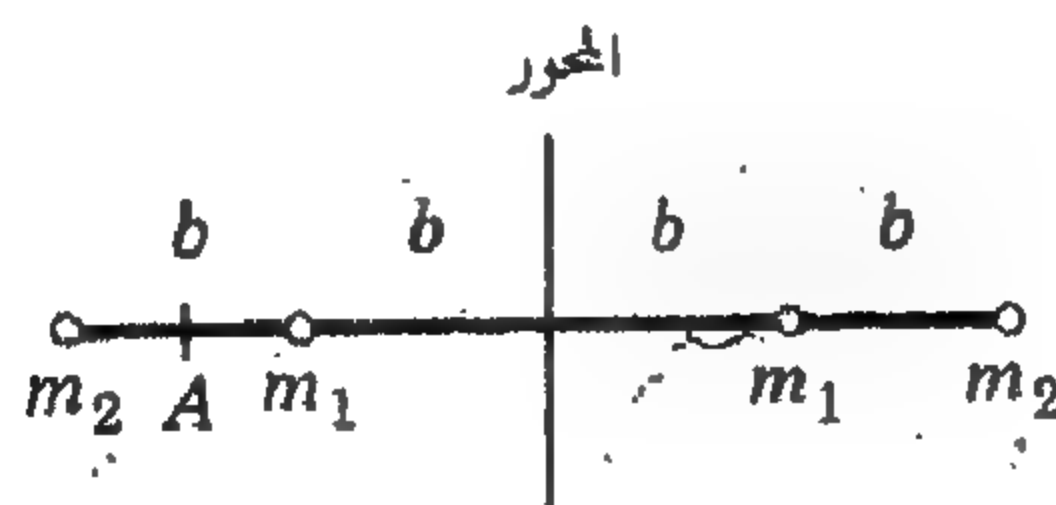
٩** - في الشكل م ٨ - ١١ وزن العمود 750 N وقيمة T_3 هي 870 N. إيجاد T_1 ، T_2 ، و W والقوة التي يدفع بها العمود الدسار للاحتكاكي عند قاعدته إلى أسفل.

١٠ - ماهو عزم القصور الذاتي للأرض بالنسبة للشمس كمحور؟ ($M_{\text{earth}} = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$ ، $M_{\text{sun}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ والمسافة بين الأرض والشمس هي $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$).



شكل م ٨ - ١١

١١ - الكتل النقطية الأربع المبينة في الشكل م ٨ - ١٢ مثبتة بشدة في قضيب عديم الوزن. (أ) إيجاد عزم القصور الذاتي للمجموعة بالنسبة للمحور المبين. (ب) كرر العمل بالنسبة لمحور مشابه يمر خلال النقطة A التي تقع في منتصف المسافة بين m_1 و m_2 . (ج) ماقيمة نصف قطر الحركة الترددية في كل حالة؟ اعتبر أن $m_1 = 0.05 \text{ kg}$ ، $b = 0.50m_2$.



شكل م ٨ - ١٢

١٢* - ركب طوقان في اطار مهمل الكتلة كما هو مبين في الشكل ١٨ - ١٣، وكانت كتلة الطوق الداخلي M_1 ونصف قطره a ، بينما كانت كتلة الطوق الخارجي M_2 ونصف قطره b . إيجاد عزم القصور الذاتي ونصف قطر الحركة الترددية في حالة الدوران حول محور عمودي على مستوى الصفحة ومار بالمركز إذا كان $M_2 = \frac{1}{2}M_1$ ، $b = 2a$.

١٣ - إيجاد عزم القصور الذاتي لقرص مصمت نصف قطره 10 cm وكتلته 200 g.

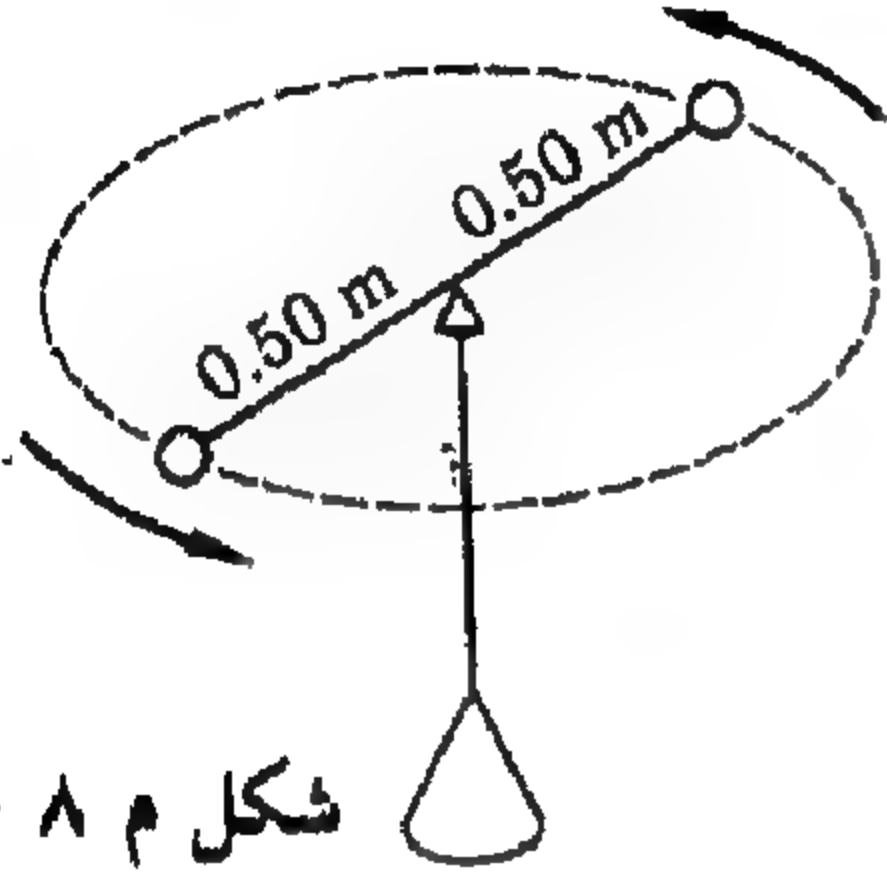
١٤ - عجلة شبيهة بالطوق وزنها 240 lb ونصف قطرها 2.0 ft. إيجاد عزم القصور الذاتي لها بالتقريب.

١٥ - ماقيمة عزم الدوران اللازم لكي يسبب تسارعا قدره 4.0 rad/s^2 لعجلة عزم القصور الذاتي لها $0.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ؟

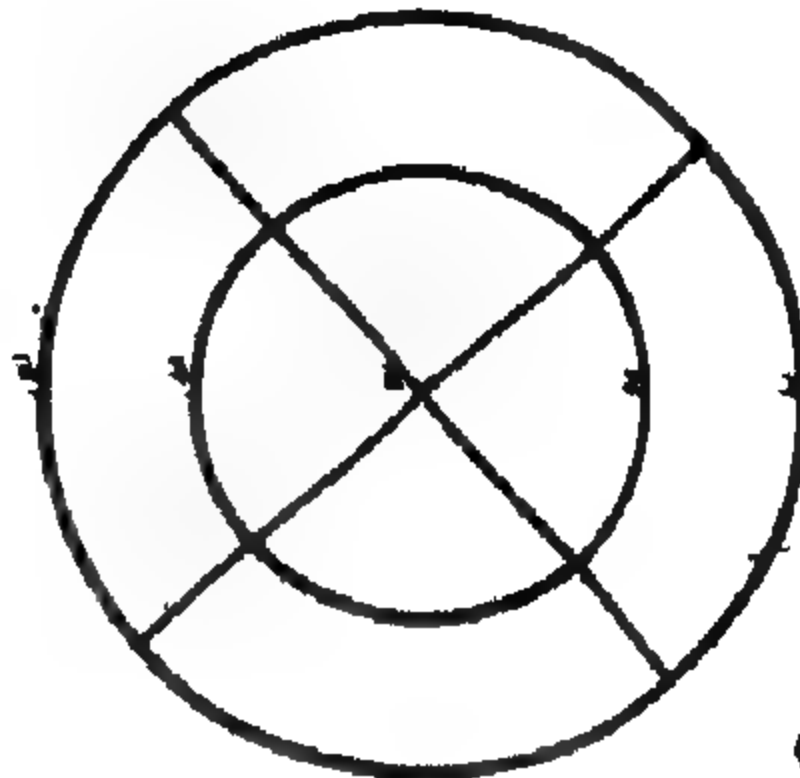
١٦ - تتحرك عجلة عزم القصور الذاتي لها هو $I = 0.20 \text{ kg.m}^2$ حركة تذبذبية بسرعة قدرها $120/\pi \text{ rev/min}$. وعندما فصل التيار عن مصدر القدرة انسابت العجلة بانتظام الى السكون في زمن قدره 100 s . ماهي قيمة متوسط عزم الدوران الذي أوقفها ؟

١٧ - (أ) ماهي قيمة عزم القصور الذاتي اللازم لتعجيل عجلة وزنها 160 lb ونصف قطر الحركة التذبذبية لها $\frac{1}{2} \text{ ft}$ من السكون الى سرعة قدرها $1/\text{m rev/s}$ في زمن قدره 20 s ؟ ماهي الزاوية التي تدورها العجلة في هذا الزمن ؟

١٨ - (أ) ماهو الزمن اللازم لكي يتسارع قرص مصمت كتلته 50 kg ونصف قطره 30 cm (يدور حول محوره العادي) من السكون الى 4.0 rad/s إذا علمت أن قوة قدرها 3.0 N تؤثر مماسيا على حافته ؟ (ب) ماهو عدد الدورات التي يدورها القرص في هذا الزمن ؟



شكل م ٨ - ١٤



شكل م ٨ - ١٣

١٩ - إرجع الى الشكل ٨ - ٢٠ . افترض في موقف مشابه أن وزن الجسم الساقط 16 lb وأن نصف القطر الخارجى للعجلة 3.0 ft . وقد وجد أن الثقل يسقط مسافة قدرها 4.0 ft في أول 20 s بعد تحريره . أوجد (أ) عزم القصور الذاتي للعجلة ، (ب) الشد في الحبل .

٢٠ - بدأ طوق نصف قطره 5.0 m في التدرج الى أسفل من السكون على مستوى مائل . (أ) ماهي السرعة الخطية للطوق عند وصوله الى نقطة تقع أسفل البداية بمسافة 30 cm ؟ (ب) ماهي سرعة دوراته بالدورات في الثانية في تلك اللحظة ؟

٢١ - كرر المسألة ٢٠ إذا كان الجسم عبارة عن عجلة نصف قطر الحركة الدورانية لها 4.0 cm ونصف قطرها الفعلي 5.0 cm .

٢٢ - يمثل الشكل م ٨ - ١٤ كرتين صغيرتين كتلة كل منهما 3.0 kg مثبتتين في نهايتي قضيب معدني خفيف طوله 1.00 m . ويرتكز القضيب عند مركزه على محور يدور القضيب حوله بسرعة قدرها 7.0 rev/min ، وكانت المجموعة مجهزة بآلية تستطيع تحريك الكرتين تجاه محور الارتكاز . (أ) أوجد عزم القصور الذاتي للجهاز الأصلي . (ب) إذا حركت الكرتان فجأة حتى أصبحت كل منهما على بعد 25 cm من محور الارتكاز ، فما هي السرعة الجديدة للدوران ؟

٢٣* - إرجع مرة أخرى الى الشكل م ٨ - ١٢ . إثبت أن عزم القصور الذاتي في حالة الدوران حول محور مواز للمحور الممين في الشكل ويبعد عنه مسافة قدرها d يعطى بالعلاقة $I = Md^2 + I_0$ حيث M هي الكتلة الكلية ، I_0 هو عزم القصور الذاتي حول محور يمر بمركز الكتلة . إهمل كتلة القضيب (هذه العلاقة هي واحدة مما يسمى نظرية المحاور المتوازية) .

٢٤* - تدور عجلة مصممة عزم القصور الذاتي لها I_0 حول محور يمر بمركزها . ثبت جسمان متماثلان في نقطتين متقابلتين على حافة العجلة تقعان على نفس القطر . فإذا كان a نصف قطر العجلة ، M كتلة كل من الجسمين ، إثبت أن عزم القصور الذاتي للعجلة يعطى الآن بالعلاقة $I = I_0 + 2Ma^2$.

٢٥** - تتكون دوامة الخيل في ملاهي الأطفال أساسا من قرص منتظم كتلته 150 kg ونصف قطره 6.0 m يدور حول محور رأسى . وكان هناك مدرس واقف على القرص عند حافته الخارجية عندما كان يدور بسرعة قدرها 0.20 rev/s . بأي سرعة سوف يدور القرص إذا مشى المدرس مسافة قدرها 4.0 m على طول القطر تجاه المركز ؟ تلميح : يجب أن تكون كمية التحرك محفوظة .

٢٦** - لنفرض أن دوامة الخيل التي وصفت في المسألة ٢٥ تتحرك بسرعة قدرها 0.20 rev/s وأنها لا تحمل أى شخص عليها . فإذا جلس مدرس كتلته 90 kg بسرعة على حافتها ، فما هي سرعتها الجديدة ؟

الفصل التاسع

الخواص الميكانيكية للمادة

ناقشنا في الفصول المختلفة السابقة تأثير القوى وعزوم الدوران على الأجسام الجاسئة . ونريد الآن دراسة بعض خواص الأجسام والمواد التي تتشوه أو تنساب عند تعرضها للقوى ، وهذا ماسوف نفعله في هذا الفصل . بالإضافة إلى ذلك سوف نعطي مقدمة عن الخواص الاستاتيكية والدينامية للسوائل .

٩ - ١ الحالات الثلاث للمادة

كلنا نعلم جيدا أن هناك ثلاثة تصنيفات عامة للمادة ، وهى الجوامد والسوائل والغازات . وفى الغازات تكون الجزيئات مستقلة تقريبا عن بعضها البعض وتتجول فى الفراغ متصادمة بعضها ببعض ولكنها لا تلتصق نتيجة للتصادم . وتؤدي تصادمات الجزيئات بجدران الوعاء الذى يحتويها إلى ظهور ضغط على هذه الجدران . وقد حسنا ضغط الغاز فى الفصل السادس ووجدنا أنه يعتمد مباشرة على طاقة حركة الجزيئات . وفى حالة الغازات الخفيفة جدا تكون طاقة حركة الجزيئات كبيرة بدرجة كافية لإهمال الفرق فى طاقة وضع الجزيء عند قاع وعاء وقمة أى وعاء معقول بالمقارنة بطاقة حركته . نتيجة لذلك تملأ جزيئات الغاز كل الوعاء الذى توضع فيه .

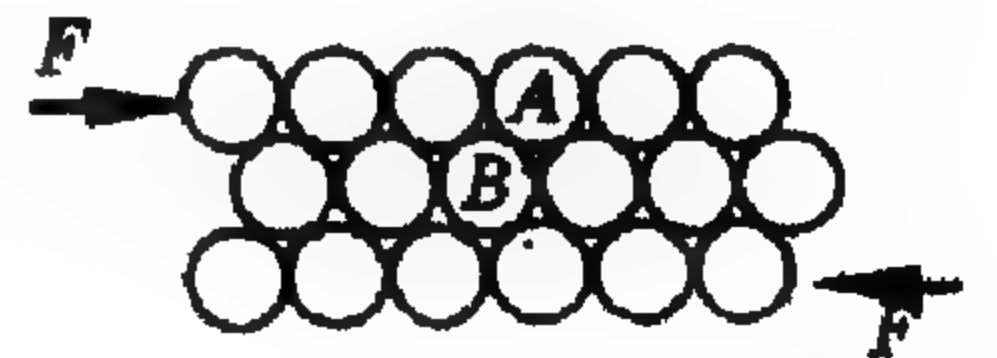
ومع ذلك فإن الوضع يختلف تماما فى حالة السوائل . وبالرغم من أننا نعلم أن جزيئات السائل توجد فى حالة حركة مستمرة ، فإن طاقة حركتها ليست كافية للتغلب على قوى جذب الجزيئات المجاورة . وهى لذلك لا تستطيع أن تنفصل تماما بعضها عن بعض ، ولهذا السبب توجد جزيئات السائل فى مجموعات مائعة من الجزيئات . ومن آن لآخر قد يكتسب جزيء طاقة حركة كافية لأن يتزعزع نفسه من سطح السائل . وهذا هو ما يحدث عندما تتبخر الجزيئات من سطح مادة وسنناقش هذه النقطة بتفصيل أكثر فى هذا الفصل . إذ تناسب السوائل والغازات بسهولة كبيرة . لذلك فإن السوائل والغازات تنتمى إلى تصنيف واحد يسمى الموائع . وبناء على هذا النظام التصنيفى ، تنقسم المواد إلى مجموعتين هما الموائع والجوامد .

أما الجوامد فإنها تشبه السوائل فى نواح كثيرة . والاختلاف بينهما هو إلى حد كبير اختلاف فى الدرجة وليس فى النوع . فبينما لا تزال الجزيئات فى السائل قادرة على الانزلاق على الجزيئات المجاورة ، فإن الجزيئات فى الجوامد مثبتة أساسا فى مكانها ، ويفسر ذلك كتقريب جيد بأن القوة بين الجزيئات فى الجوامد كبيرة لدرجة أن الجزيء يثبت فى مكانه بشدة بواسطة الجزيئات المجاورة ومن ثم فإن هذه المادة صلبة وجاسئة لأن الجزيئات لا تستطيع الانزلاق على بعضها البعض . وهذا موضع تخطيطى فى الشكل ٩ - ١ .

فإذا كان جزيئان مثل A و B فى الشكل مرتبطين سويا بشدة فلن يكون من السهل فصلهما . وعندئذ لن تستطيع القوى الموضحة فى الشكل فصل الجزيئات ، ولذلك فإن المادة لن تنساب تحت تأثيرها . ومن ناحية أخرى ، إذا كانت قوى الجذب بين الجزيئين A و B صغيرة نسبيا فإن القوى المسلطة ستسبب انزلاق الطبقات الجزيئية على بعضها البعض . وفى هذه الحالة تكون المادة مائعة .

شكل (٩ - ١)

يحدد مدى سهولة انزلاق الطبقات الجزيئية على بعضها البعض تحت تأثير القوى الميَّنة على قوى الجذب بين الجزيئات كالجزيئين A و B .



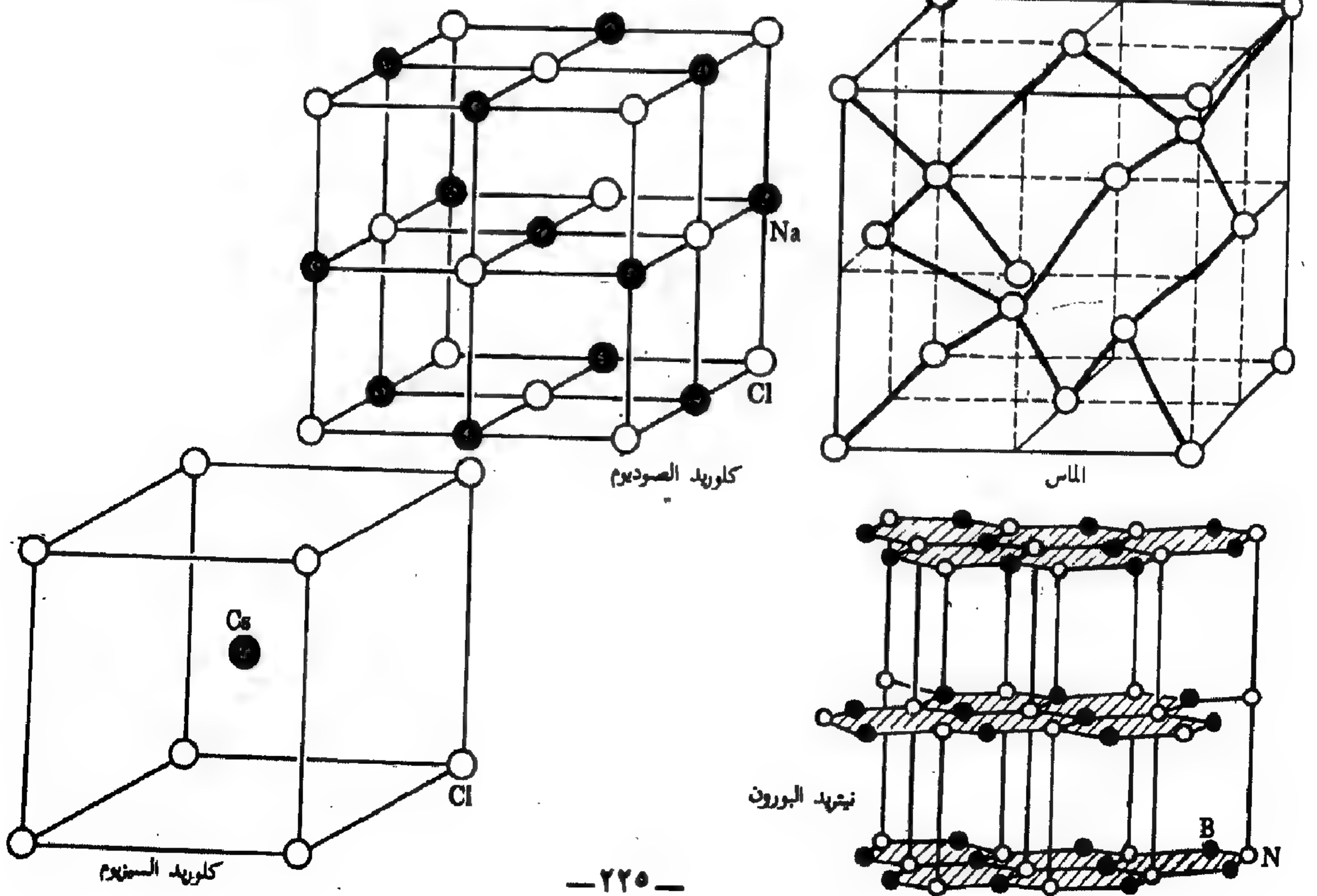
وفي بعض الحالات يصعب أن نقول ما إذا كانت المادة جامدا أم سائلا . فمثلا ،
إذا برد دبس السكر (العسل الأسود) فإنه يصبح « غليظا » أو لزجا جدا (من
هنا أتت العبارة « أبطأ من العسل الأسود في يناير ») . وعند درجات الحرارة الأكثر
انخفاضاً يصير العسل الأسود صلبا للغاية . وبعد ، هل هو جامد ، أم مجرد سائل
لزج جدا ؟

ويعتبر زجاج النوافذ مثالا آخر لمثل هذه المواد . فزجاج النوافذ المستخدم حاليا
أكثر صلادة من الزجاج الذي كان يستخدم منذ سنوات كثيرة . وليس من غير
المعتاد أن تجد زجاج النوافذ القديم جدا أكثر سمكا في الجزء السفلي منه في الجزء
العلوي ، ومن الواضح أنه قد انساب ببطء شديد مع مرور السنين . وتنصرف اللدائن
بنفس هذه الطريقة أيضا . يتضح من هذه الأمثلة إذن أن الخط الفاصل بين الجوامد
والسوائل ليس حادا . وسوف نرى في هذا الفصل أن هناك في الواقع نوعين من
الجوامد ، أحدهما مجرد سائل لزج جدا .

٩ - ٢ الجوامد البلورية والزجاجية

البلورة هي مجموعة من الذرات أو الجزيئات يحتل فيها كل جزيء موضعا
محددا بدقة في نمط محدد بالنسبة لجيرانه . ويتكرر هذا النمط مرات ومرات
في كل مكان في البلورة . وكمثال لذلك يمكننا أن نذكر بلورة كلوريد الصوديوم
(ملح الطعام) ، الذي يصور الشكل ٩ - ٢ أجزاء صغيرة منها .

شكل (٩ - ٢)
النسق البلورية لبعض
الجوامد .



لاحظ أن ذرات الصوديوم والكلور توجد في نظام هندسي مثالي في أركان مكعب . وتتكون البلورة كلها من عدد كبير من هذه المكعبات المتراسة في نظام تام . فإذا اخذنا ذرة صوديوم في أى مكان في البلورة فإننا نجد أن الذرات المجاورة مرتبة بنفس الطريقة تماما كالذرات المجاورة لأى ذرة صوديوم أخرى .

ولكن بنية كثير من البلورات ليست بنفس بساطة النسق التكعيبي لبلورة كلوريد الصوديوم . وبالرغم من ذلك هناك دائما نمط ترتيب محدد للذرات في أى بلورة . ويتكرر هذا النمط مرات بطريقة تشبه إلى حد كبير طريقة تكرار النمط في كثير من أنواع ورق الحائط ، إلا أن النمط في البلورة ثلاثى الأبعاد ولا يوجد في مستوى واحد فقط . ويمثل الشكل ٩ - ٢ أمثلة نموذجية أخرى .

يختلف الموقف كثيرا في السوائل عالية اللزوجة ، والتي تصل لزوجتها إلى درجة كونها صلدة وقصيفة . في هذه الحالة لا تكون الجزيئات أكثر ترتيبا منها في السائل المنصهر . وقد يوجد قدر ضئيل من الترتيب بالقرب من جزيء معين ، ولكن هذا الترتيب لا يستمر في كل مكان في السائل . وفي هذه السوائل تكون الجزيئات مشبة في مكانها ولكن غير مرتبة في أى نمط محدد . وتسمى السوائل مفرطة التبريد زجاجا .

وبالرغم من أن معظم أنواع زجاج النوافذ غير بلورية ، أى سوائل مفرطة التبريد ، فإن هناك كثيرا من المواد الأخرى التي يمكن أن توجد كزجاج . فكثير من اللدائن زجاج غير بلورى ، أى غير متبلور . ومع ذلك فإن بعض اللدائن كالبوليثيلين متبلورة جزئيا وغير متبلورة جزئيا . وعادة مايكون من الصعب أن نحدد ماإذا كانت مادة صلبة معينة متبلورة أو غير متبلورة . وأفضل وسيلة لحسم ذلك هى استخدام الأشعة السينية بالطريقة التي سوف ندرسها باختصار في فصل لاحق من هذا الكتاب .

٩ - ٣ الكثافة والوزن النوعي

هناك طرق كثيرة يمكن أن توصف بها المادة . وتعتمد إحدى أهم هذه الطرق على كمية المادة الموجودة في وحدة الحجم وتوصف المادة في هذه الحالة بدلالة الكثافة الكتلية . تعرف الكثافة الكتلية لمادة بأنها كتلة وحدة الحجم من هذه المادة . إذن الكثافة الكتلية = الكتلة / الحجم ، أو بالرموز :

$$d = \frac{m}{V} \quad (٩ - ١)$$

ومن الواضح أن وحدات الكثافة الكتلية هي الجرام لكل سنتيمتر مكعب ، الكيلوجرام لكل متر مكعب .. الخ. ويستخدم مفهوم الكثافة الكتلية نادرا في النظام البريطاني للوحدات .

في النظام البريطاني تستخدم الكثافة الوزنية بدلا من الكثافة الكتلية .
وتعرف الكثافة الوزنية بأنها وزن وحدة الحجم من المادة ويمكن صياغة هذا التعريف في صورة معادلة كالتالي :

$$D = \frac{W}{V} \quad (9 - 2)$$

وعادة يعبر عن الكثافة الوزنية بالوحدات باوند لكل قدم مكعب . وبالطبع هناك وحدات أخرى للكثافة الوزنية ، ولكنها لا تستخدم عادة . وحيث أن $W = mg$ فإن :

$$D = dg$$

وفي كثير من الاحيان يستخدم نفس الرمز للدلالة على الكثافة الوزنية والحجمية ،
وتحدد الكمية المعنية من سياق الكلام . وكثيرا ما يستخدم الحرف اليوناني ρ (رو) للتعبير عن الكثافة الكتلية بدلا من d أو D .

يتمدد كثير من المواد عند تسخينها ، ويحدث هذا التمدد نتيجة لأن الجزيئات تهتز لمسافات أكبر عند درجات الحرارة الأعلى ، لذلك فإن المسافة بين الجزيئات تزداد .
وحيث أن وحدة الحجم سوف تتغير إذا تباعدت الجزيئات عن بعضها البعض ، فإن كثافة المادة سوف تتغير مع درجة الحرارة . وبالرغم من أن كثافة معظم المواد تقل بزيادة درجة الحرارة فإن هناك بعض الاستثناءات الشائعة التي تزداد فيها الكثافة بالفعل عند ارتفاع معين في مدى معين من درجات الحرارة . ومن أمثلة هذه المواد الماء في المدى من 0 إلى 4.0°C . وعلى سبيل المثال أعطيت كثافة بعض المواد المألوفة في الجدول ٩ - ١ . وعند استخدام هذه البيانات من المناسب أن تعلم أن :

$$1 \text{ kg/m}^3 = 10^3 \text{ g/cm}^3$$

جدول ٩ - ١
كثافة بعض المواد

المادة	درجة الحرارة °C	d_t kg/m ³	D_t lb/ft ³
الهواء (عند الضغط المعتاد)	0.0	1.29	0.0805
البنزين	20.0	879	56.1
الماء	20.0	998	62.3
الماء	3.98	1,000	62.4
المعظم	20.0	~1,800	106-125
الالنيوم	20.0	2,700	168
الحديد	20.0	7,860	491
النحاس	20.0	8,920	557
الرصاص	20.0	11,340	708
الزئبق	0.0	13,600	849

يعرف الوزن النوعي ، أو الكثافة النسبية ، لمادة بأنها النسبية بين كثافة المادة وكثافة الماء . ولابد من تحديد درجة الحرارة التي تعين فيها هذه النسبة . ومن المعتاد أن تؤخذ هذه النسبة عند 3.98°C وهي درجة الحرارة التي تكون فيها كثافة

الماء 1000 kg/m^3 . وفي هذه الحالة يتساوى الوزن النوعى عدديا مع الكثافة الكتلية مقاسة بالوحدة g/cm^3 .

٩ - ٤ قانون هوك

توصف المادة بطريقة أخرى بدلالة قابليتها للتشوه . وهناك نوعان أساسيان من التشوه . النوع الأول تناسب فيه المادة تحت تأثير القوة ، وهذا السلوك مميز للموائع . أما النوع الثانى ، وهو مؤقت فقط ، فإنه مرن فى طبيعته ، ومن أمثلته (استطالة) الزنبرك . ويمتاز هذا النوع من التشوه بأنه إذا أزيلت القوة المشوهة فإن التشوه يعود صفرا مرة أخرى . لنفحص الآن هذا النوع الأخير من التشوه .

إذا تعرض قضيب جاسىء كالمبين فى الشكل ٩ - ٣ لقوة مطيلة بتعليق ثقل فيه فإن القضيب سوف يستطيل مسافة قدرها ΔL . وفى معظم المواد الصلبة يكون الرسم البيانى الذى يمثل العلاقة بين الحمل المستخدم F والاستطالة ΔL شبيهاً بدرجة كبيرة بالشكل ٩ - ٤ . ويوضح هذا الشكل أنه إذا ضعف الحمل المستخدم فإن مقدار الاستطالة سوف يتضاعف . ويعبر عن ذلك رياضياً بالمعادلة التالية :

$$F = (\text{const})(\Delta L) \quad (٩ - ٣)$$

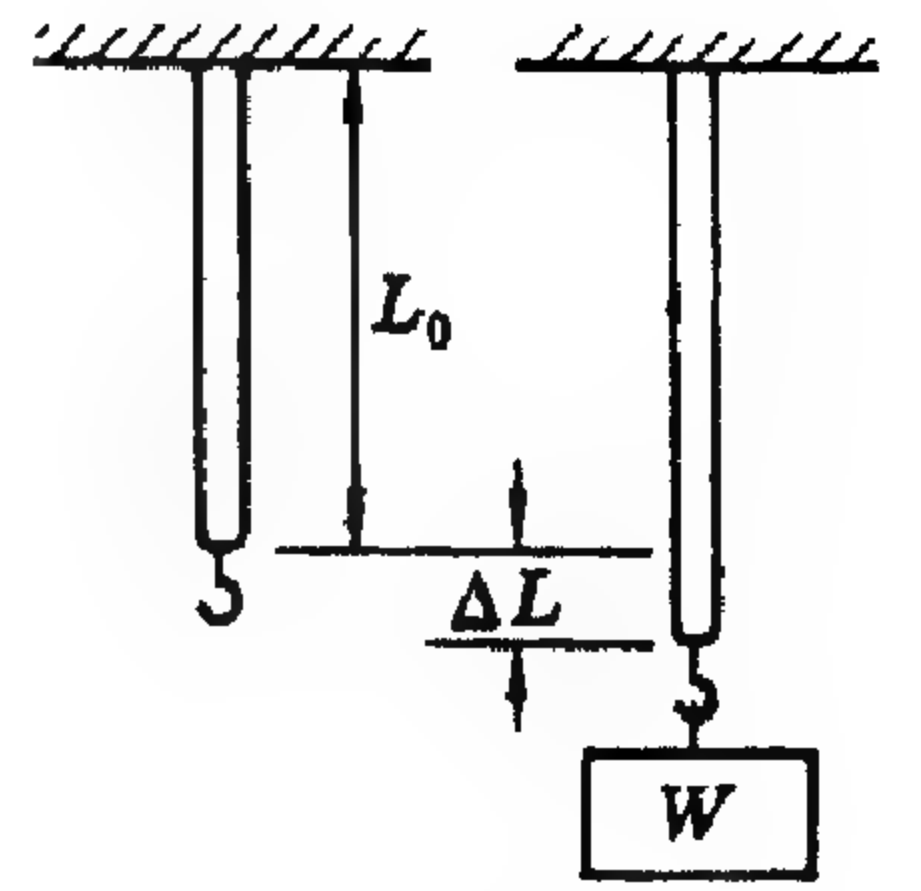
حيث F هى القوة المؤثرة . علاوة على ذلك فإن القضيب يعود إلى طوله الأصلى بعد إزالة الحمل إذا لم يكن هذا الحمل كبيراً جداً . ويقال عندئذ أن القضيب مرن فى هذا المدى من الأحمال . وتمثل المعادلة (٩ - ٣) الصيغة الرياضية لقانون هوك الذى ينص على مايلى :

قانون هوك يتناسب التشوه مع القوة المشوهة

ونؤكد ثانية أن التشوه يعود صفرا مرة أخرى عند إزالة القوة المشوهة وذلك فى مدى المرونة .

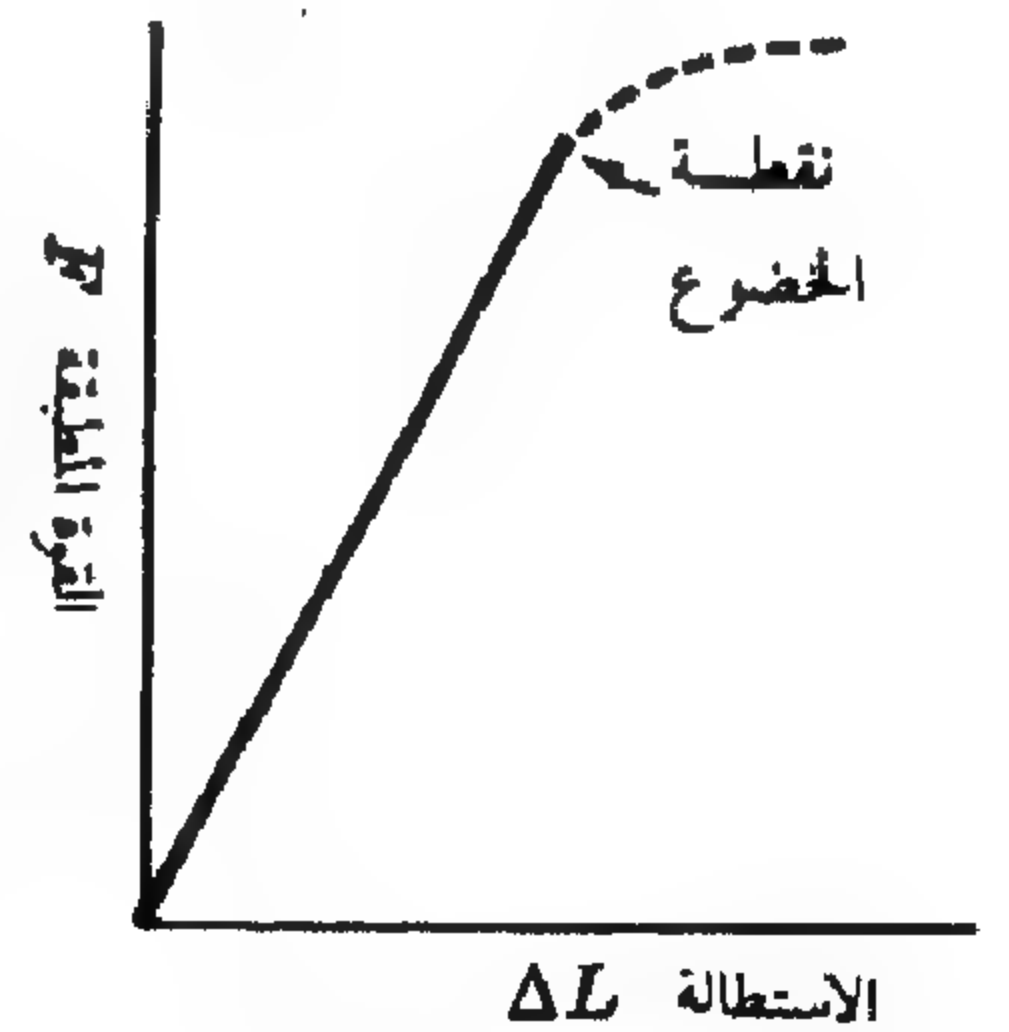
وبالرغم من ذلك فإن الرسم البيانى الموضح فى الشكل ٩ - ٤ سوف يبدأ فى الانحراف عن الخط المستقيم - ربما انحرف كما هو مبين بالمنحنى المنقط - إذا كان الحمل المطبق على القضيب كبيراً جداً . علاوة على ذلك فإن القضيب لا يعود عادة إلى طوله الأصلى تماماً بعد إزالة الحمل . ويقال فى هذه الحالة أن القضيب قد استطال بعد حد مرونته . وقد ينكسر القضيب إذا زيد الحمل كثيراً بعد حد المرونة .

وتفسر استطالة القضيب بدلالة جزيئاته أو ذراته بأن القوة المطيلة ، أو قوة الشد ، تسبب تباعدها عن بعضها البعض . ويتضح من الشكل ٩ - ٥ أن قوة الشد قد فصلت الذرات قليلاً فى اتجاه القوة . وتؤدي الانفصالات الصغيرة جداً عند



شكل (٩ - ٣)

يتناسب مقدار استطالة القضيب تحت تأثير الحمل W مع الحمل ومع L_0 أيضاً ، بشرط أن يتحقق قانون هوك .



شكل (٩ - ٤)

المنحنى التمثيلى للإجهاد والانفعال ، وينطبق قانون هوك فى المنطقة الخطية .

جمعها في اتجاه طول القضيب إلى الاستطالة المشاهدة . وطالما كانت هذه الانفصالات بين الذرات صغيرة فإن مسافة الانفصال تتناسب مع القوة المطيلة المستخدمة ويتحقق قانون هوك ، أى المعادلة (٩ - ٣) . ومع ذلك فإن المدى الذى يتحقق فيه قانون هوك يختلف بدرجة كبيرة من مادة لأخرى ، وعادة مايكون من الصعب التنبؤ به بدون تخطيط رسم يبانى كالمبين فى الشكل ٩ - ٤ بالفعل .

٩ - ٥ الإجهاد والانفعال

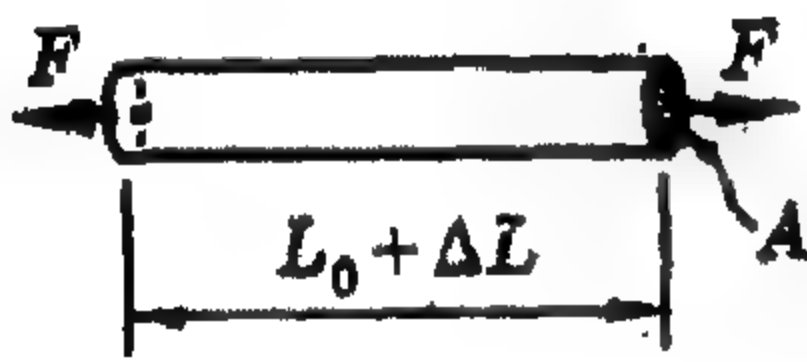
يمكن صياغة قانون هوك فى صورة اكثر نفعا . وإذا وضعت هذه الصيغة بدلالة الإجهاد والانفعال فإنها سوف تنطبق على مواقف كثيرة مختلفة .

الإجهاد والانفعال مصطلحان لهما معنى محدد فى علم الفيزياء وبالرغم من أن هاتين الكلمتين تستخدمان كثيرا فى اللغة الدارجة الا أن استخدام العلماء لهما مبنى على التعريف المضبوط لهاتين الكلمتين كما سنرى حالا .

يعرف الإجهاد بأنه القوة المطبقة على وحدة المساحات من السطح الذى تطبق عليه القوة . لنعتبر القضيب المبين فى الشكل ٩ - ٦ على سبيل المثال . قوة الشد (أو القوة المطيلة) F مطبقة فى هذه الحالة على سطح طرف القضيب ، وواضح من الشكل أن مساحة مقطع القضيب هى A . يعرف الإجهاد على القضيب إذن كالتالى :

$$\text{الإجهاد} = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}} = \frac{F}{A} \quad (٩ - ٤) \quad \text{تعريف}$$

لاحظ على وجه الخصوص أن المساحة المعنية ليست المساحة الخارجية للقضيب ولكن مساحة مقطعه فقط .



شكل (٩ - ٦)

الإجهاد هو F/A والانفعال هو $\Delta L/L_0$.

وحدات الإجهاد هى الباوند لكل قدم مربع ، الباوند لكل بوصة مربعة ، النيوتن لكل سنتيمتر مربع ... الخ . وقد تذكر أن الضغط يقاس أيضا بنفس هذه الوحدات ، فقد رأينا أن كلا من الإجهاد والضغط يعرف بأنه القوة لوحدة المساحات . ومن ثم فإن الضغط على جدار وعاء هو مجرد القوة الضاغطة لوحدة المساحات من الجدار وليس القوة المطيلة المبينة فى الشكل ٩ - ٦ . وسوف نرى فى اجزاء لاحقة من هذا الفصل أنواعا أخرى من الإجهادات لأجسام ذات أشكال هندسية مختلفة .

يعرف انفعال جسم ما بأنه تشوه هذا الجسم مقسوما على بعده الاصلى قبل التشوه . فمثلا يعتبر الانفعال فى القضيب المبين فى الشكل ٩ - ٥ مقياسا لمقدار استطالة القضيب . ولكن استطالة القضيب ΔL تحت تأثير القوة المطبقة ليست مقياسا جيدا للانفعال فى القضيب وذلك لأن قضيبا طوله ضعف القضيب

المبين في الشكل سيستطيل ضعف استطالة القضيب الأول تحت تأثير نفس القوة ، وهذا لأن عدد انفعالات الذرات فيه ضعف ما في الأول . ومن ثم فإن ΔL تتناسب مع طول القضيب عند ثبوت الإجهاد . ولكي نتخلص من هذا الاعتماد على الطول يعرف الانفعال في الحقيقة بأنه استطالة قضيب طوله الأصلي وحدة واحدة .

أى أن :

$$\text{الانفعال} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\text{الاستطالة}}{\text{الطول الأصلي}} = \text{الانفعال} \quad (9 - 5)$$

والانفعال ليس له وحدات ، لأنه ببساطة النسبة بين طوليه .

سوف نرى في أجزاء لاحقة أن هناك أنواعا عديدة من الانفعال تعتمد على الشكل الهندسى للنظام . ونحن نتكلم الآن عن انفعال الشد وإذا ضغط القضيب فإن الانفعال سيكون النسبة بين النقص في الطول والطول الأصلي . يمكننا الآن إعادة صياغة قانون هوك . وحيث أن القوة F تتناسب مع التشوه ، يمكننا استبدال F بالاجهاد لأن كلا منهما يتناسب مع الآخر . بالمثل يمكننا استبدال التشوه بالانفعال . إذن فإن قانون هوك سيصبح كالتالى :

$$\text{الانفعال} \propto \text{الاجهاد} \quad \text{قانون هوك}$$

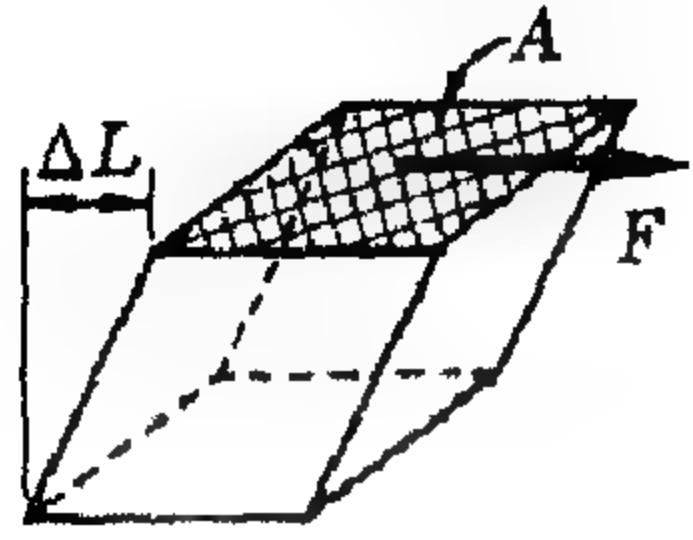
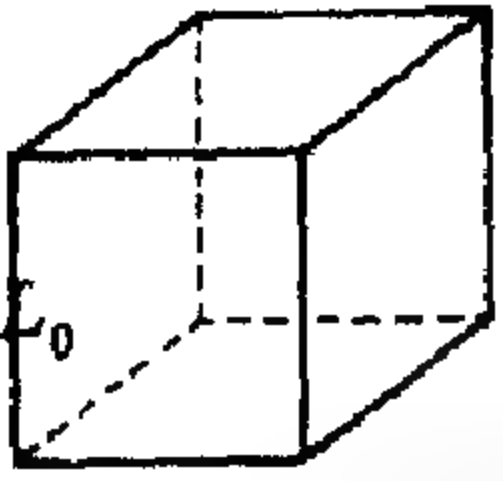
ويمكن تطبيق قانون هوك في هذه الصورة على مواقف كثيرة أخرى خلاف استطالة القضيب . فمثلا ، ثبت أن قانون نيوتن ينطبق على استطالة وانحناء والتواء عديد من الزنبركات والأجسام الأخرى .

٩ - ٦ مفهوم المعامل

إذا كان الإجهاد اللازم لإحداث انفعال صغير في جسم ما كبيرا ، فإن الجسم يكون صلبا وجاسئا ، وتقاس خاصية الصلادة ، أو الجسوءة بمعامل المادة . وهناك أنواع مختلفة من المعاملات لمختلف أنواع تشوه المادة كالاستطالة والانحناء وغير ذلك ، وسنناقش في هذا الجزء بعضا من هذه المعاملات . وتعرف جميع هذه المعاملات بالمعادلة التالية لأشكال هندسية خاصة :

$$\text{المعامل} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}}$$

وحيث أن الانفعال لأحداث له ، فإن وحدات المعامل هى نفس وحدات الإجهاد .



شكل (٩ - ٧)
 ΔL مبالغ فيها هنا لكي يمكن
 رؤيتها بسهولة ويعطى معامل
 القص بالكمية $\frac{F/A}{\Delta L/L_0}$

معامل يونج*		الانضغاطية		عدد
10^{10} N/m^2	10^6 lb/in^2	$10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$	$10^{-7} \text{ in}^2/\text{lb}$	
35	51	0.5	0.3	سحس
19-20	27-29	0.6	0.4	صلب
18-20	26-29	0.7	0.5	حديد (مطاول)
~14	~20	—	—	عظم الفخذ
10-13	14-19	0.8	0.5	نحاس
				نحاس أصفر
9	13	1.6	1.1	(مدلس على البارد)
8-10	12-14	1.0	0.7	حديد (زهر)
5.6-7.7	8-11	1.5	1.0	الومنيوم
~0.14	~0.20	20	15	بوليسترين
—	—	50	34	ماء
—	—	100	69	زيت

* العلامة 10^{10} N/m^2 تعني أن وحدات الأرقام المدرجة في الجدول أكبر 10^{10} مرة من N/m^2 . إذن γ للنتجستين هو $35 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.

معامل يونج : يستخدم هذا المعامل لوصف المواقف التي تشبه استطالة القضيب المبين في الشكل (٩ - ٦). وتوضح أهمية هذا المعامل عندما يراد حساب استطالة سلك أو قضيب تحت تأثير قوة شد معينة. ومن التعريف نجد أن :

$$\gamma = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} = \text{معامل يونج} \quad (٩ - ٦) \quad \text{معامل يونج}$$

ويوضح الجدول ٩ - ٢ قيم γ لبعض المواد.

معامل القص . افترض أننا نريد تشويه مكعب من مادة معينة بالطريقة المبينة في الشكل ٩ - ٧. لذلك يجب أن تطبق قوة F موازية للوجه العلوي ومساحته A . وفي هذه الحالة يظل الإجهاد F/A والانفعال $\Delta L/L_0$ ، ولكن لاحظ تعريف هذه الرموز في الشكل. إذن :

$$\text{معامل القص} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad (٩ - ٧) \quad \text{معامل القص}$$

وبالرغم من أن هذه المعادلة تماثل معادلة معامل يونج ٩ - ٦، يجب أن نلاحظ أن الرموز فيهما معرفة بطريقتين مختلفتين.

وقد وجد أن معامل القص لكثير من المواد يساوي ثلث معامل يونج تقريبا. ويستثنى من هذه القاعدة أساسا المواد التي يتغير حجمها عند التشوه أو المواد التي تختلف خواصها باختلاف الاتجاهات.

في كثير من الأحيان يكون من المفضل استخدام مقلوب معامل القص ومعامل يونج (أى معامل الشد) وهى تقيس مدى سهولة تشوه المادة وليس مدى صلابتها تشوهها ، ولهذا فإنهما يسميان بالاسمين الوصفين مطاوعة القص ومطاوعة الشد .

معامل الحجم . لنفرض أن قالباً حجمه V_0 قد تعرض لزيادة في الضغط مقدارها ΔP على جميع جوانبه كما هو موضح في الشكل ٩ - ٨ . عندئذ سوف يتقلص حجم المكعب بمقدار ΔV . ويعرف الانفعال في هذه الحالة بالكمية $\Delta V/V_0$ بينما يكون الإجهاد هو الضغط المطبق . وكما هي العادة ، يعرف معامل الحجم بالنسبة بين الإجهاد والانفعال .

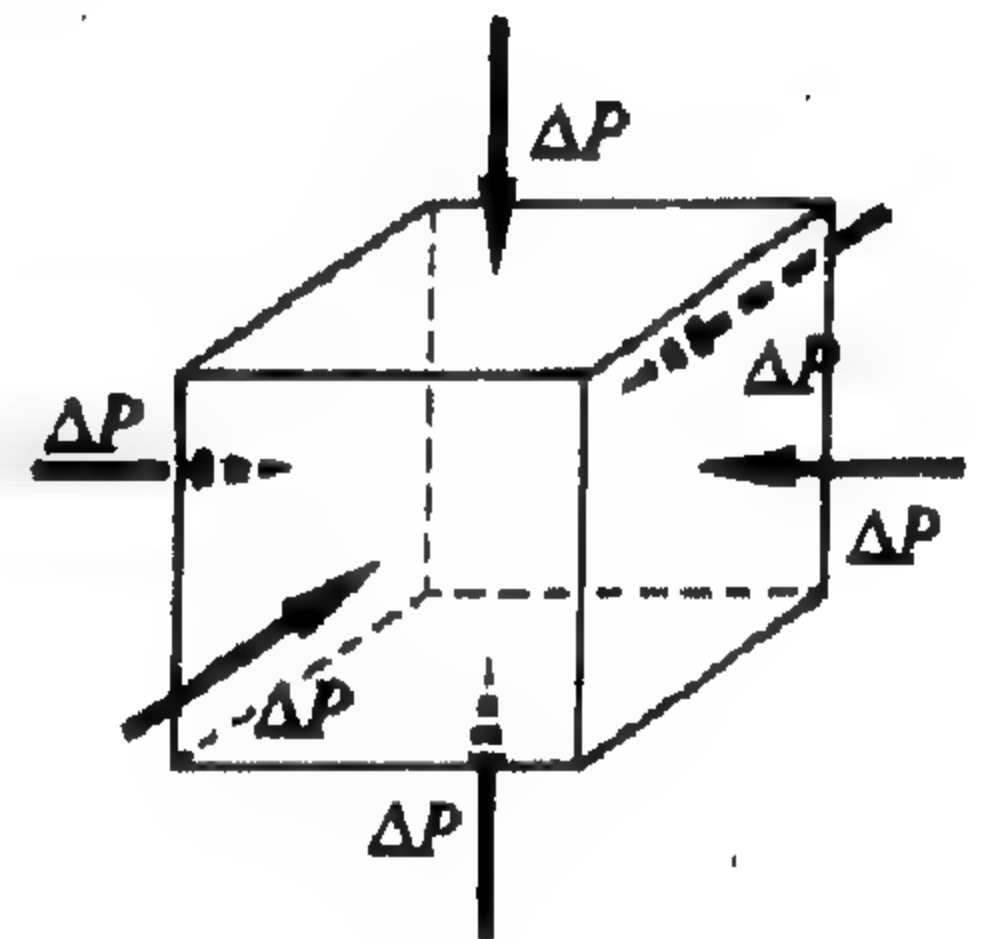
إذن :

$$\text{معامل الحجم} = E = \frac{\Delta P}{\Delta V/V_0} \quad (٩ - ٨)$$

وسنناقش مقلوب هذه الكمية ، أى الانضغاطية ، فيما بعد
الانضغاطية الحجمية k . يعتبر معامل الحجم مقياساً لدرجة الصعوبة التي تنضغط بها المادة ، في حين أن الانضغاطية k تعتبر مقياساً لدرجة السهولة التي تنضغط بها المادة . والانضغاطية هي مقلوب معامل الحجم . وعادة تكتب معادلة تعريف الانضغاطية كالتالى :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = k \Delta P \quad (٩ - ٩)$$

وحداتها هي وحدات مقلوب الضغط ، وقد أعطينا في الجدول ٩ - ٢ بعض القيم النموذجية لها . لاحظ أن انضغاطية السوائل أكبر كثيراً من انضغاطية الجوامد البلورية . وهذا يعكس بوضوح حقيقة أن المسافات بين جزيئات السائل كبيرة نسبياً ، ويؤدي الانضغاط ببساطة إلى تقارب الجزيئات من بعضها البعض .



شكل (٩ - ٨)

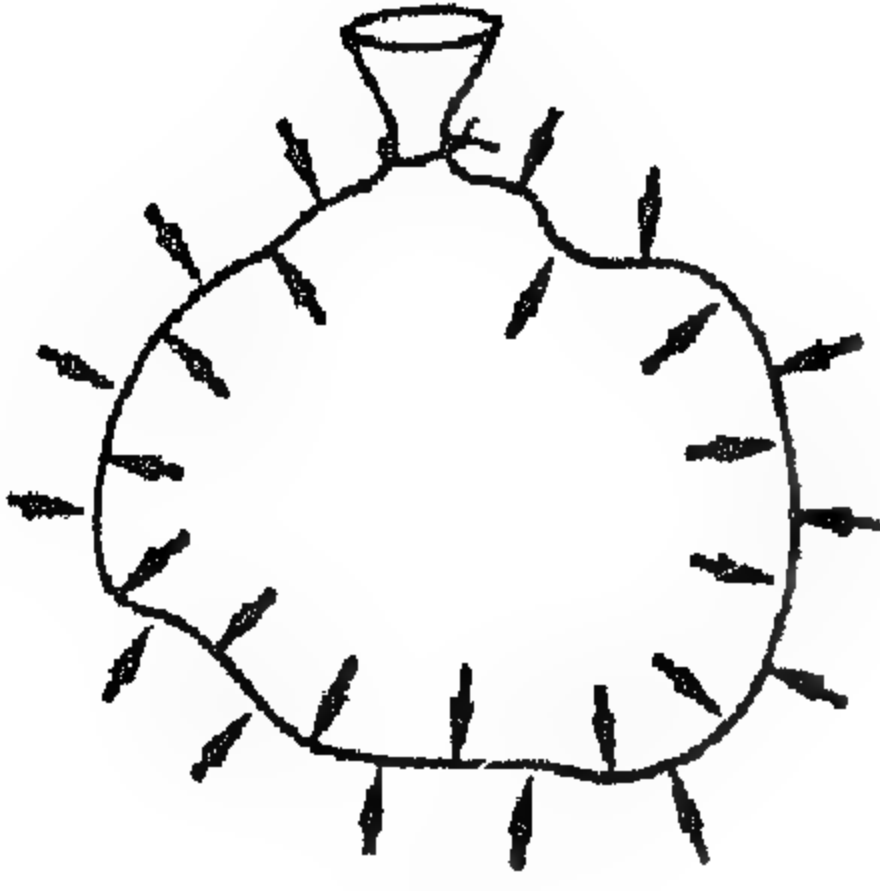
سوف ينكمش المكعب ذو الحجم الاصل V_0 بمقدار ΔV عند زيادة الضغط الخارجى بمقدار ΔP

٩ - ٧ الضغط في مائع

أنت وأنا نعيش في قاع بحر ضخم من الهواء . وتوجد أجسامنا بشكل دائم تحت الضغط الناتج من وزن ارتفاع هائل من الهواء الموجود فوقنا . وكما سنرى في الفصل التالى ، تتعرض كل بوصة مربعة من أجسامنا لقوة تساوى حوالى 14.7 lb ($1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) ولكننا بالرغم من ذلك لانشعر فى أكثر الحالات بوجود هذه القوة . لماذا ؟

يشبه الجسم في كثير من الوجوه كيساً من الورق مملوء بالهواء فقط ، إذ توجد في داخلنا فجوات كالرئتين مثلاً ، وتكافئ هذه الفجوات بشكل تقريبي داخل الكيس الورق . وعندما نفلق فوهة الكيس فإنه لا ينطوى تحت تأثير ضغط الهواء عليه ، لأن

الهواء الموجود في داخل الكيس يؤثر عليه بقوة متجهة إلى الخارج تساوى القوة التى يؤثر بها الهواء الخارجى عليه إلى الداخل والتى تحاول أن تسبب انطواءه (أنظر الشكل ٩ - ٩) . وحيث أن هاتين القوتين متزنتان فإن الكيس يبدو كما لو لم يوجد أى ضغط للهواء عليه . وهذا صحيح أيضا بالنسبة لأجسامنا .



شكل (٩ - ٩)

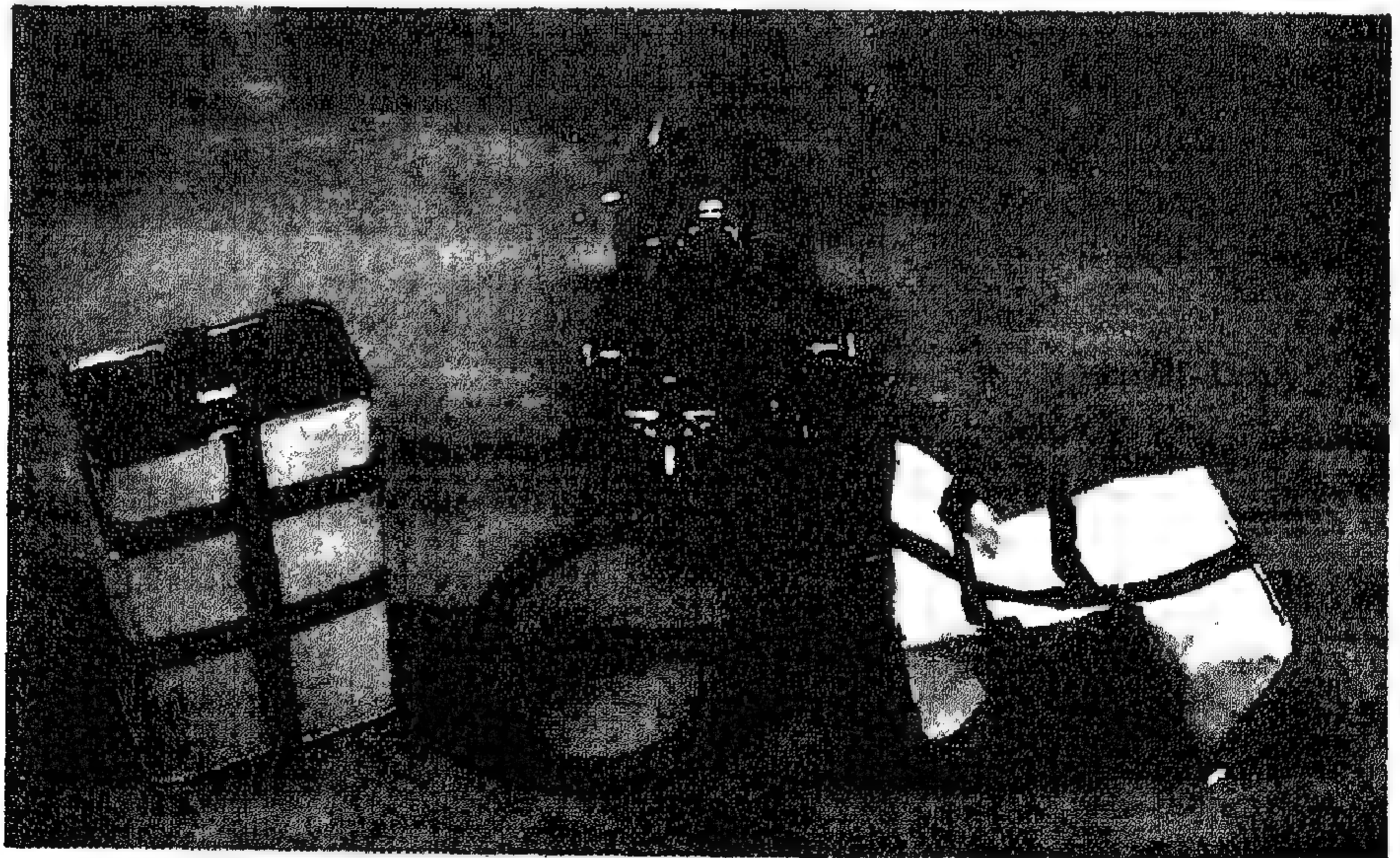
ينطوى الكيس لأن ضغط الهواء عليه من الداخل يتزن مع ضغط الهواء عليه من الخارج .

ومع ذلك فإذا تخلفنا من الهواء الموجود داخل الكيس فإن القوى المتجهة إلى الخارج والمؤثرة على الكيس من الداخل ستختفى ، وعندئذ سوف ينطوى الكيس . ويظهر الضغط الهائل للهواء بشكل درامى عندما يفرغ الهواء بالضغط من علبة معدنية . ومالم تكن العلبة صلبة إلى أبعد حد فإنها سوف تنهار تحت تأثير الضغط غير المتزن للهواء الذى نعيش فيه . وهذا موضح فى الشكل ٩ - ١٠ .

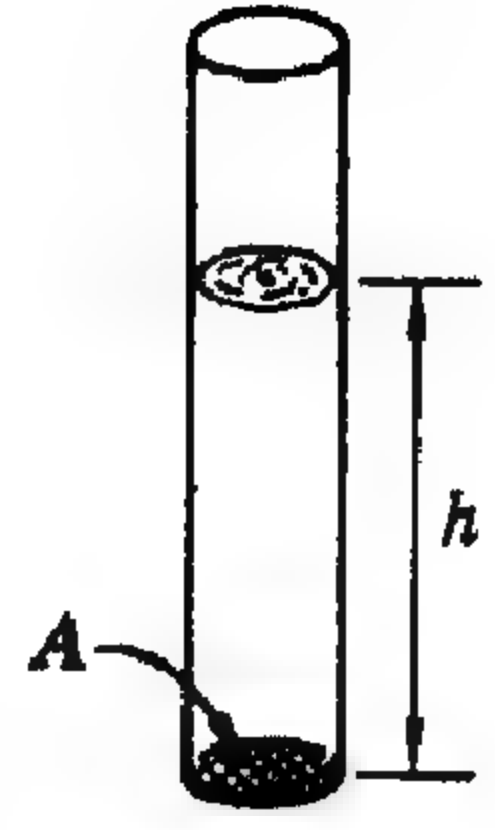
وتمثل الظاهرة العكسية للظاهرة التى ناقشناها توا أهمية حياة أو موت فى عصر الطيران فى الفضاء الذى نعيش فيه الآن وحتى فى حالة الطائرات النفاثة التى تطير على ارتفاعات كبيرة . لنفرض أن الكيس المبين فى الشكل ٩ - ٩ موجود فى سفينة فضائية ، وأن السفينة قد تعرضت لحادثة أدت إلى انهيار الضغط فيها . عندئذ سوف يهبط الضغط فى السفينة فجأة إلى الصفر ، وبذلك تختفى القوى المؤثرة على الكيس من الخارج . نتيجة لذلك لن يصبح ضغط الهواء فى داخل الكيس متزنا بعد ، ومن ثم فإن الكيس سوف ينفجر . ومن الواضح أن الإنسان سيتعرض لخطر رهيب فى مثل هذا الموقف .

شكل (٩ - ١٠)

يفرغ الهواء من العلبة المعدنية بالضغط ، وتنهار العلبة تحت تأثير القوى غير المتزنة الناتجة من الضغط الجوى خارجها .



لندرس الآن الضغوط الناتجة من أعمدة الموائع التي يمثل الشكل ٩ - ١١ حالة بسيطة منها في صميم الموضوع . وواضح من الشكل أن طول عمود السائل الموجود في الأنبوبة هو h ومساحة مقطعه A . يراد الآن حساب الضغط على المساحة السفلية A نتيجة للمائع الموجود فوقها .



سبق أن عرفنا الضغط في الفصل السادس بأنه القوة المؤثرة على وحدات المساحات ، أو ، بالرموز :

$$P = \frac{F}{A}$$

شكل (٩ - ١١)

القوة المؤثرة على قاع
الأسطوانة نتيجة للمائع
تساوى وزن المائع .

حيث F يجب أن تكون عمودية على A . إذن ، القوة الناتجة من المائع على قاع الوعاء تساوى مجرد وزن السائل الموجود فوقها . ولكن وزن وحدة الحجم من المائع هو الكثافة الوزنية للمائع D كما ذكرنا سابقا . ومن ثم فإن القوة المؤثرة على قاع الوعاء نتيجة للمائع هي حجم المائع الموجود فوق القاع hA مضروباً في وزن وحدة الحجم D ويعبر عن هذه القوة في صورة معادلة كمايلي :

$$F = (hA)(D)$$

بقسمة طرفي المعادلة على مساحة المقطع A نجد أن ضغط مائع ارتفاعه h يعطى بالعلاقة :

$$\Delta P = \frac{F}{A} = hD$$

ونحن نستخدم ΔP للدلالة على هذه الكمية وليس لأن الكمية التي حسبناها هي فقط جزء من الضغط . ذلك لأن المائع الإضافي الموجود فوق المائع المعنى ، وكذلك الضغط الجوي يشاركان في تكوين الضغط الكلي P ، وهو أكبر من الكمية التي حسبناها ΔP .

يلاحظ أننا استخدمنا الكثافة الوزنية D في التعبير الخاص بالكمية ΔP . أما إذا أردنا التعبير عن هذه العلاقة بدلالة الكثافة الكتلية d فسيكون من الضروري أن نوجد وزن كتلة معينة من المائع . وكتلة عمود المائع هي حجمه hA مضروباً في كتلة وحدة الحجم d . ولكن وزن كتلة معينة يساوى هذه الكتلة مضروبة في تسارع الجاذبية g وعليه فإن ضغط مائع ارتفاعه h هو :

$$\Delta P = hD$$

$$\Delta P = h d g$$

ضغط المائع أو :

(٩ - ١٠)

مثال توضيحي ٩ - ١ : اوجد ضغط عمود من الماء ارتفاعه 34 ft .

طريقة الحل : من الجدول ٩ - ١ نجد أن الكثافة الوزنية للماء هي 62.4 lb/ft³ .
إذن ، من المعادلة (٩ - ١٠) :

$$\Delta P = (34 \text{ ft})(62.4 \text{ lb/ft}^3) = 2120 \text{ lb/ft}^2$$

وإذا فضلنا قياس الضغط بالباوند لكل بوصة مربعة ، يمكننا استخدام حقيقة أن
 $1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in}^2$ ، إذن :

$$\Delta P = \left(2120 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}\right) \left(\frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2}\right) = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

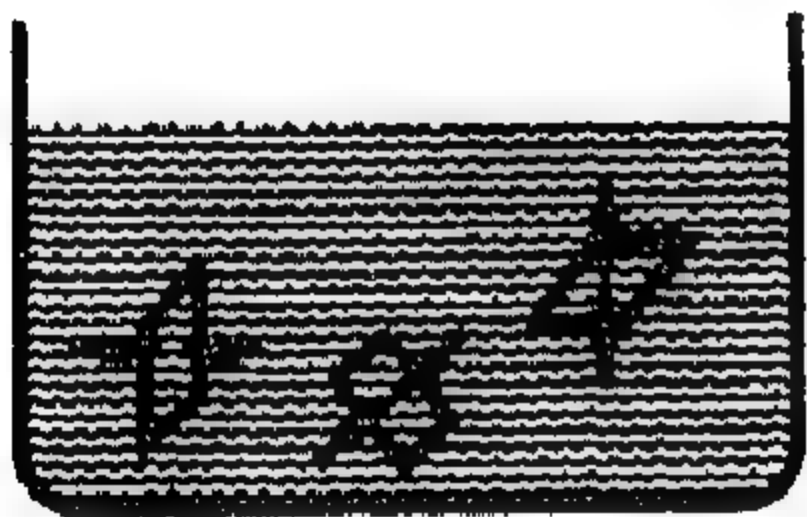
لاحظ أن هذا الضغط يساوى تماماً الضغط عند سطح الأرض نتيجة لوزن الهواء الموجود فوق الأرض ، والذي أعطى سابقاً في هذا الجزء . إذن ، ضغط الهواء على سطح الأرض يكافئ ضغط عمود من الماء ارتفاعه 34 ft (10.4 m) .

مثال توضيحي ٩ - ٢ : اوجد ضغط عمود من الزيت ارتفاعه 76 cm .

طريقة الحل : من الجدول ٩ - ١ نجد أن الكثافة الكتلية للزيت هي 13.600 kg/m³ .
وحيث أن $\Delta P = h \rho g$ ، إذن :

$$\Delta P = (0.76 \text{ m})(13,600 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ N/kg}) = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

(اثبت باستخدام المعادلة $F = ma$ أن من الممكن التعبير عن وحدات g بالنيوتن لكل كيلوجرام كما يمكن التعبير عنها بالوحدات المعتادة وهي المتر في الثانية المربعة) .
وبالرغم من أننا لن نتابع الموضوع هنا أكثر من ذلك . فإن هذا الضغط يساوى 14.7 lb/in² . ومن ثم فإن الضغط الذى يسببه عمود من الزيت ارتفاعه 76 cm يكافئ الضغط الجوى .



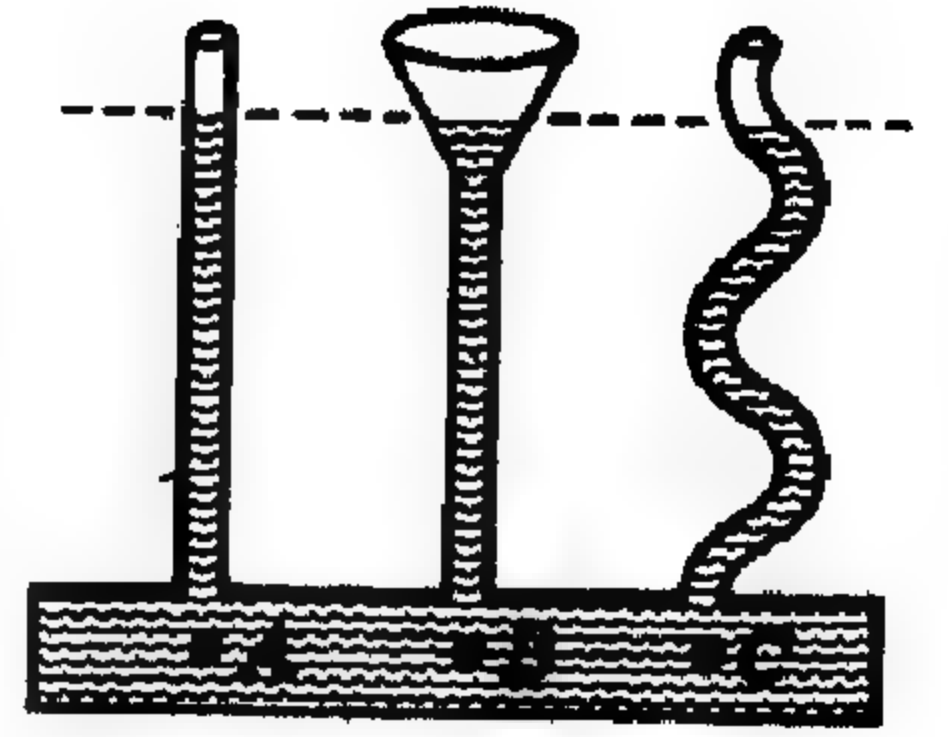
٩ - ٨ خواص الضغط في الموائع

يؤثر الضغط في الموائع في جميع الاتجاهات . ويمكن التحقق من ذلك بسهولة عند دراسة التجربة العملية الموضحة في الشكل ٩ - ١٢ . إذا أخذت قطعة من الورق الرقيق ووضعتها بالقرب من قاع صهرنج به ماء كما هو مبين في الشكل فإن الورق الرقيق لن ينحني أو يتحرك بدرجة محسوسة نتيجة لضغط الماء الساكن . يجب إذن أن نستنتج أن القوة الناتجة من ضغط الماء على أحد وجهى قطعة الورق تتزن مع قوة أخرى مساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه تؤثر على الوجه الآخر . وحيث أن هذا صحيح مهما كان اتجاه قطعة الورق ، فإن ضغط السائل في نقطة معينة يجب أن يكون متساوياً في اتجاه معين وفي الاتجاه المعاكس .

شكل (٩ - ١٢)

حيث أن فروخ الورق يمكن أن يوجد في حالة توازن في الأوضاع الميئة ، نستنتج أن الضغط في أى نقطة في السائل متساو في جميع الاتجاهات .

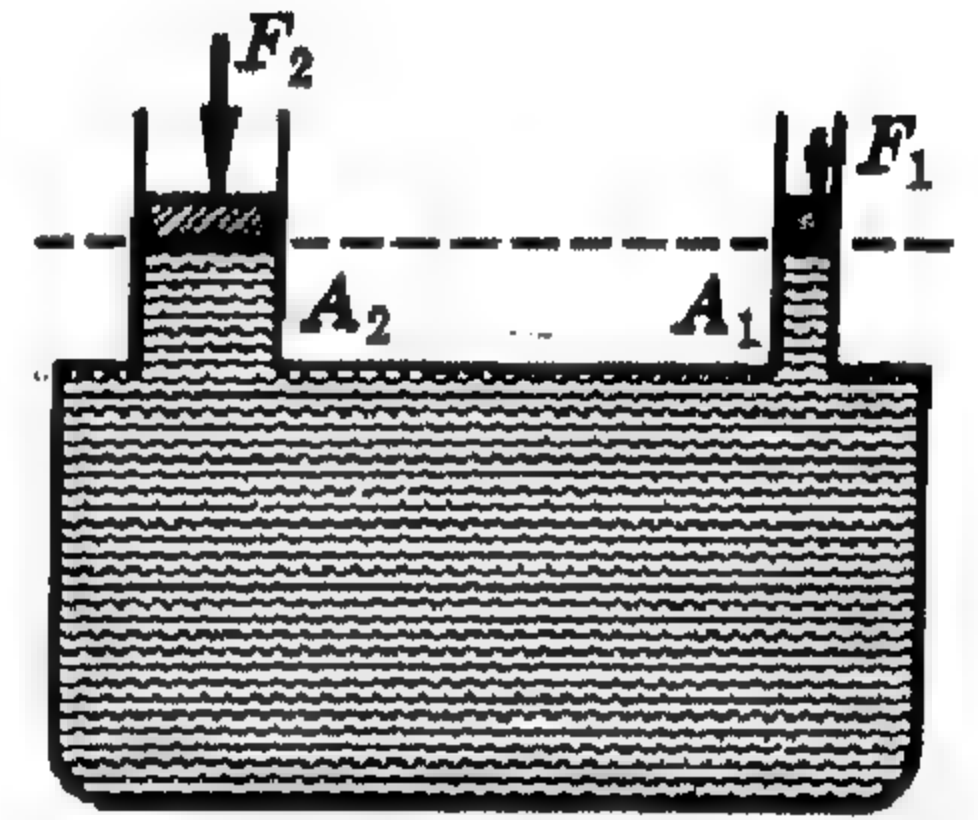
وحيث أن ضغط السائل في أى نقطة تحت سطح السائل في الشكل ٩ - ١٢ هو hD حسب المعادلة (٩ - ١٠) ، فإن الضغط يجب أن يكون واحداً في جميع النقط الواقعة على عمق معين بالنسبة للسطح ، وهذا الضغط يؤثر على أى سطح موجود على هذا العمق في السائل مهما كان اتجاهه . وهذا كله واضح بالنسبة للحالة المبينة في الشكل ٩ - ١٢ . ولكن ماذا عن الحالة المبينة في الشكل ٩ - ١٣ ؟ هل الضغط متساو في النقط A ، B ، C ؟



شكل (٩ - ١٣)

لماذا يقف السائل على نفس الارتفاع في الانابيب الثلاثة كلها ؟

يجب أن يكون الضغط واحداً عند كل من هذه النقط والا انساب السائل في اتجاه أو آخر في الأنبوبة السفلية . من الواضح إذن أن شكل الوعاء غير هام . وعموماً فإن المعادلة (٩ - ١٠) التي تعطى ضغط مائع ارتفاعه h صحيحة مهما كان نوع الوعاء الذى يحتوى على المائع . حاول بنفسك أن توضح لماذا تستطيع القوة الكلية الصغيرة المؤثرة عند قاعدة الأنبوبة B أن تحمل كمية كبيرة من السائل ، بينما تحمل نفس القوة كمية أقل من السائل عند A . تلميح : هل يحمل القمع أى كمية من السائل ؟



شكل (٩ - ١٤)

تستطيع قوة صغيرة مؤثرة على الكباس الصغير أن تتزن مع قوة كبيرة مؤثرة على الكباس الكبير .

لنفرض الآن أن لدينا سائلاً محبوساً في وعاء كالمبين في الشكل ٩ - ١٤ . وهذا الجهاز هو في الواقع إحدى صور المكبس الهيدرولى لنفرض أن A_1 و A_2 هما مساحتا مقطع الكباسين المبينين . وإذا لم تؤثر على الكباسين أى قوى ، وإذا كان وزن الكباسين مهملاً فإن سطح السائل في الأنبوبتين سيقع على نفس الارتفاع .

وعندما تطبق قوة خارجية F_1 على الكباس ١ فإن الكباس ٢ سوف يدفع إلى أعلى ما لم تطبق عليه قوة F_2 . وإذا كانت F_2 كافية لمنع حدوث الحركة فإن السائل سوف يظل ساكناً . من الواضح إذن أن زيادة الضغط على الكباس ١ يجب أن تعادل بضغط مساوية في كل مكان في السائل ، لأنه إذا لم يكن هذا صحيحاً فإن الضغط غير المتزن سيسبب انسياب الماء . وهذا هو مثال لقاعدة باسكال . ويمكن صياغة هذه القاعدة كالتالى :

قاعدة باسكال

إذا طبق ضغط على سائل مقيّد فإن هذا الضغط ينتقل إلى كل نقطة

في السائل

وبالطبع لابد أن يظل السائل ساكناً لكي يكون هذا صحيحاً .

من المهم حساب القوة F_2 اللازمة للاتزان مع القوة F_1 .

الضغط الإضافى في السائل نتيجة للقوة F_1 هو :

$$\Delta P = \frac{F_1}{A_1}$$

وطبقا لقاعدة باسكال ، تؤثر هذه الزيادة في الضغط أيضا على الكباس 2 ، أى أن السائل يؤثر على الكباس 2 بقوة قدرها F_2 حيث :

$$F_2 = \Delta P A_2$$

وبالتعويض عن ΔP نجد أن :

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$$

وإذا كانت مساحة الكباس الثانى أكبر كثيرا من مساحة الكباس الأول ، فإن F_2 ستكون أكبر كثيرا من F_1 . لهذا فإن مثل هذا الجهاز قادر على أن يرفع ثقلا كبيرا باستخدام قوة صغيرة . يمكنك أن تقتنع بنفسك ، بالرغم من ذلك ، بأن القوة الصغيرة F_1 تبذل كمية من الشغل تساوى F_2 تماما لكى ترفع الكباس الثانى مسافة s . وإذا لم يكن هذا صحيحا ، فإن هذا الجهاز يمكن تحويله إلى مكينة الحركة الدائمة .

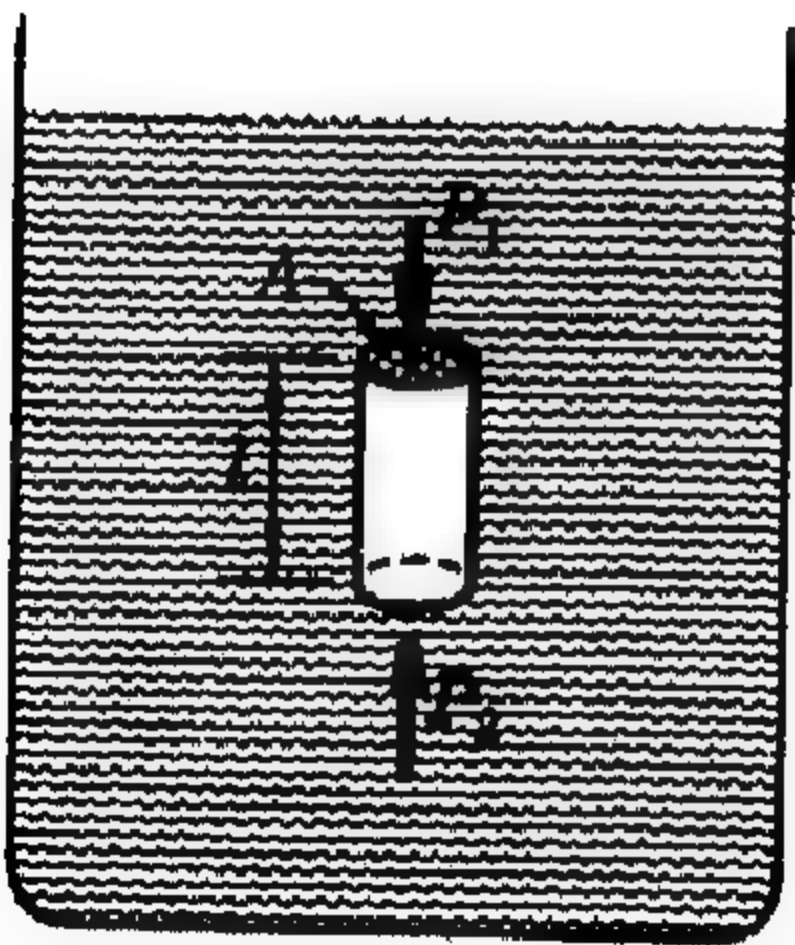
٩ - ٩ نظرية ارشميدس

تطفو الأجسام على السوائل فى أحيان كثيرة كما نعلم جميعا ، وحتى إذا غاصت الأجسام فى السوائل فإنها تبدو أقل وزنا فى السائل منها عندما لا تغمر فيه . وتنعكس هذه التأثيرات حقيقة أن هناك قوة متجهة إلى أعلى تساعد فى حمل الجسم المغمور ، وتسمى هذه القوة بقوة الطفو .

وتنص قاعدة الطفو ، التى كان ارشميدس أول مكتشف لها ، على الآتى :-

قاعدة
ارشميدس

إذا غمر جسم جزئيا أو كليا فى سائل فإنه يدفع إلى أعلى بقوة تساوى وزن السائل الذى يزيحه الجسم .



فمثلا ، إذا أنغمر جسم معين حجمه 3 ft^3 فى الماء فإن قوة الطفو (BF) المؤثرة عليه ستساوى وزن الماء المزاح ، أى وزن 3 ft^3 من الماء . وحيث أن الكثافة الوزنية للماء 62.4 lb/ft^3 فإن قوة الطفو ستكون $(62.4)(3)$ ، أو 187 lb .

وفى بعض الحالات يكون من السهل بمكان إثبات صحة قاعدة ارشميدس . اعتبر قطعة أسطوانية من مادة مغمورة فى سائل كما هو مبين فى الشكل ٩ - ١٥ . فى هذه الحالة تكون قوة الطفو المؤثرة على الأسطوانة هى الفرق بين القوة المؤثرة على القاعدة العلوية للأسطوانة $P_2 A$ ، والقوة المؤثرة على القاعدة السفلية للأسطوانة ، $P_1 A$:

$$BF = P_2 A - P_1 A = A(P_2 - P_1)$$

شكل (٩ - ١٥)
قوة الطفو المؤثرة على
الاسطوانة تساوى وزن
السائل المزاح .

ولكن $P_2 - P_1$ هو ببساطة ΔP ، أى فرق الضغط نتيجة لارتفاع من السائل قدره $h = l$ كما في الشكل . وحيث أن $\Delta P = lD$ ، حيث D الكثافة الوزنية للسائل ، فإن :

$$BF = (Al)D$$

ولكن Al هو ببساطة حجم الاسطوانة المغمورة . نجد إذن أن :

$$(\text{حجم الأسطوانة}) (D) = \text{قوة الطفو}$$

وحيث أن حجم الأسطوانة يساوى حجم السائل المزاح ، إذن الطرف الايمن للعلاقة السابقة هو وزن السائل المزاح ، أو :

$$BF = \text{وزن السائل المزاح}$$

وهذا هو نص قاعدة ارشميدس

مثال توضيحي ٩ - ٣ : مكعب من الخشب طول كل من أضلاعه 2.0 ft يطفو على الماء بحيث يغمس ثلاثة أرباعه . ما وزن هذا المكعب ؟
طريقة الحل : يمثل الشكل ٩ - ١٦ هذا الموقف . ونظر لأن المكعب طاف فإنه في حالة توازن . من الواضح أن الوزن يتزن مع قوة التعويم . إذن :

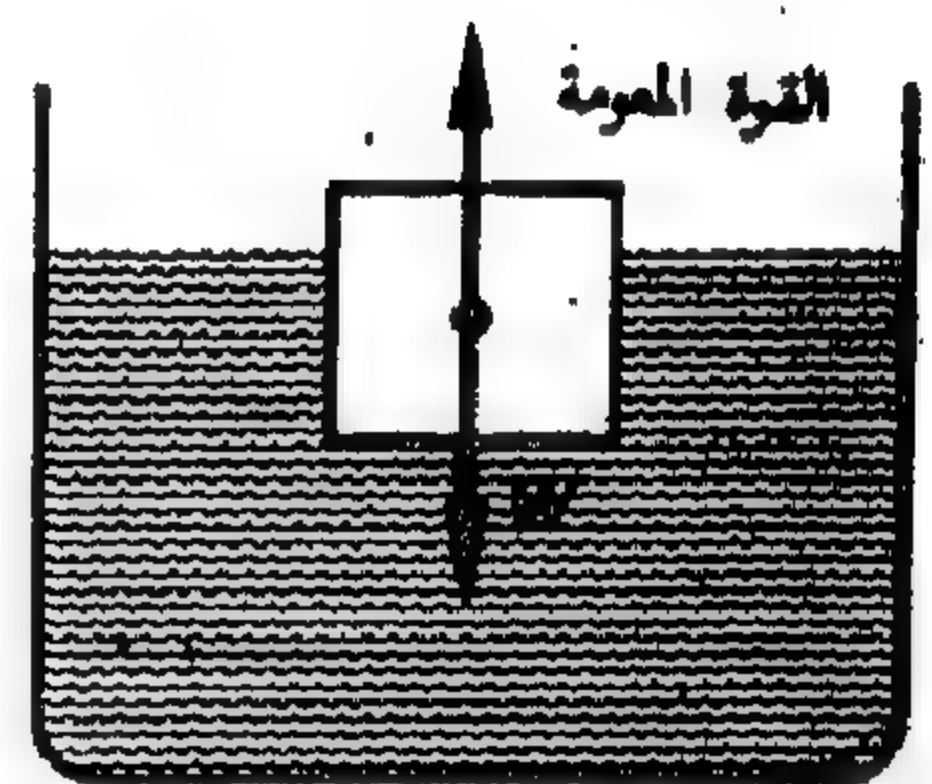
$$W = BF$$

وحيث أن ثلاثة أرباع قالب الذى حجمه 8 ft^3 مغمورة فإن وزن الماء المزاح هو $(8 \text{ ft}^3)(\frac{3}{4}) = 6 \text{ ft}^3$ ولكن $D = 62.4 \text{ lb/ft}^3$ للماء ، إذن وزن الماء المزاح هو $(62.4 \text{ lb/ft}^3)(6 \text{ ft}^3) = 374 \text{ lb}$. وطبقا لقاعدة ارشميدس هذه الكمية تساوى ايضا BF وحيث أن $W = BF$ فإن :

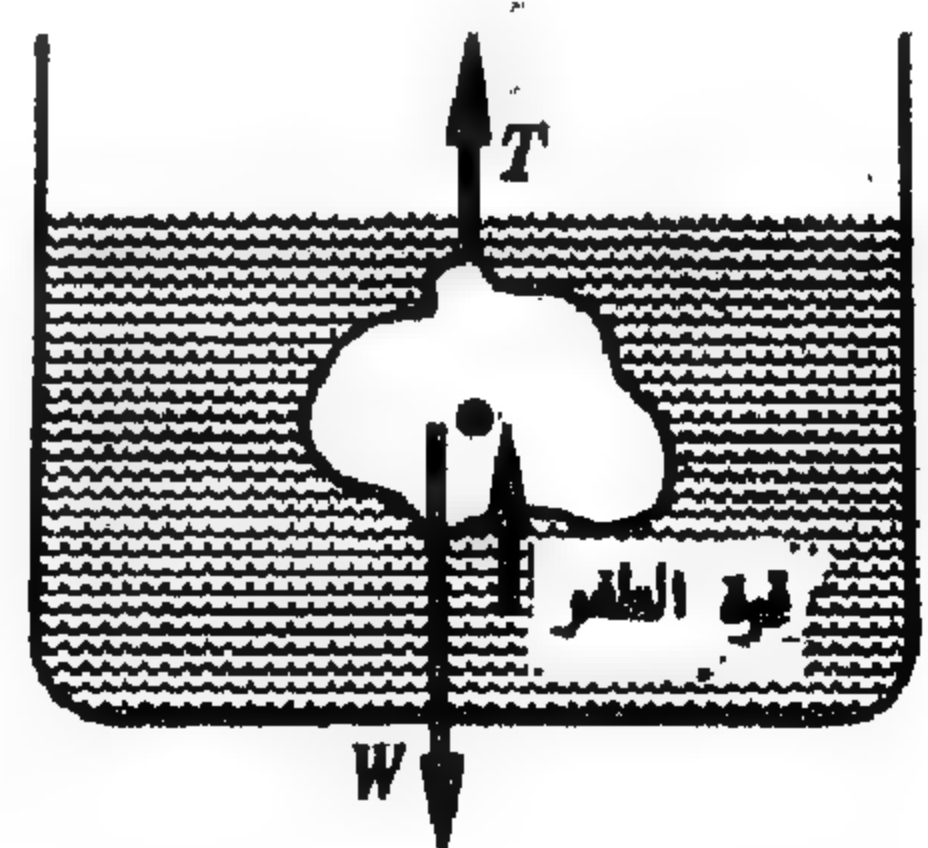
$$W = BF = 374 \text{ lb}$$

مثال توضيحي ٩ - ٤ : علقت قطعة معدنية كتلتها 20 g وكثافة مادتها 4.0 g/cm^3 في خيط وغمست في الزيت ($d = 1.50 \text{ g/cm}^3$) كما هو مبين في الشكل ٩ - ١٧ . ما قيمة الشد في الخيط ؟

طريقة الحل : واضح من الشكل ٩ - ١٧ أن هناك ثلاث قوى تؤثر على الجسم . وحيث أنه في حالة توازن فإن $\Sigma F_y = 0$ ومنه نجد أن :



شكل (٩ - ١٦)
ما هو الشرط اللازم لتحقيق
حتى لا يغمس المكعب ؟



شكل (٩ - ١٧)
يعادل وزن الجسم مع
مجموع قوة الطفو والشد في
الخيط

$$T + BF - W_0 = 0$$

حيث W_0 وزن الجسم . يراد إيجاد T .

$$T = W_0 - BF$$

وحيث أن $W = mg$ ، إذن $W_0 = m_0g$ حيث m_0 هي 0.020 kg .

لايجاد قوة الطفو BF يجب أن نلاحظ أنها تساوى وزن السائل المزاح بالجسم . ونحن نحتاج إلى إيجاد حجم السائل المزاح أولاً ، ونحن نعلم أنه يساوى حجم الجسم . ومن تعريف الكثافة يمكننا أن نكتب العلاقة التالية بالنسبة للجسم :

$$V_0 = \frac{m_0}{d_0} \quad \text{أو} \quad d_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

وهو ايضا حجم السائل المزاح V_f . إذن :

$$V_f = \frac{m_0}{d_0}$$

ومن تعريف الكثافة نجد أن كتلة السائل المزاح هي $V_f d_f$ ، وحيث أن $W = mg$ ، إذن وزن السائل المزاح هو :

$$W_f = m_f g = V_f d_f g$$

ولكن هذا الوزن هو أيضا قوة الطفو . وعليه فإن :

$$BF = V_f d_f g$$

وبالتعويض عن V_f بقيمته التي أوجدناها سابقا وهي m_0/d_0 نحصل على :

$$BF = m_0 g \frac{d_f}{d_0}$$

يمكننا الآن أن نعوض في المعادلة الأصلية للشد T وهي بالتحديد :

$$T = W_0 - BF$$

لنحصل على :

$$T = m_0 g - m_0 g \frac{d_f}{d_0}$$

وباستخدام نظام الوحدات SI $m_0 = 0.020 \text{ kg}$ ، $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ،

$d_f/d_0 = 1.5/4.0$ ، وبالتعويض عن هذه القيم نحصل على :

$$T = (0.0125 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 0.1225 \text{ N}$$

لاحظ أن الشد يكافئ وزن جسم كتلته 0.0125 kg .

٩ - ١٠ تعيين الكثافة

لنقضى الآن بعض الوقت في مناقشة كيفية تعيين كثافة المواد . ونحن نعلم أن

$$D = \frac{W}{V} \quad \text{و} \quad d = \frac{m}{V}$$

إذن ، إذا أريد إيجاد d أو D يجب معرفة m أو W بالإضافة إلى حجم الجسم . ويمكن إيجاد قيمة m و W للجسم بسهولة باستخدام الميزان . وفي حالات معينة يمكن قياس الحجم باستخدام عدد القياس ذات الفكين أو القوارير الحجمية المدرجة . وإذا لم يكن ذلك ممكنا يوجد الحجم عادة باستخدام قاعدة ارشميدس . ويمكن إيجاد حجم الجسم بمعلومية قوة الطفو BF المؤثرة عليه عندما يكون مغمورا في سائل معلوم الكثافة . وحيث أن قاعدة ارشميدس تخبرنا أن :

$$BF = V_f D_f$$

(حيث يشير الدليل السفلي f إلى السائل ، وحيث أن $V_f = V_0$ عندما يكون الجسم مغمورا ، فإن :

$$V_0 = \frac{BF}{D_f} \quad \text{أو} \quad BF = V_0 D_f$$

أما قوة الطفو BF فتقاس بسهولة بوزن الجسم مرتين إحداهما في الهواء والثانية عندما يكون مغمورا في السائل . (في القياسات ذات الدقة العالية يلزم إجراء تصحيح للتخلص من تقويم الهواء) . وحيث أن الفرق بين الوزنين هو BF ، إذن :

$$BF = \text{الوزن } W_1 \text{ في الهواء} - \text{الوزن } W_2 \text{ في السائل}$$

ومعلومية BF من هاتين القياستين يمكننا التعويض عنها وعن كثافة السائل المعلومة في العلاقة التالية لنحصل على حجم الجسم :

$$V_0 = \frac{BF}{D_f}$$

من السهل إذن إيجاد كثافة الجسم . وإذا قيس وزن الجسم ، فإن :

$$D_0 = \frac{W_0}{V_0}$$

أما إذا كانت الكتلة معلومة ، فإن :

$$d_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

وحيث أن $W_0 = m_0 g$ ، من الواضح أن :

$$D = dg$$

إذن ، إذا أوجدنا D أو d يكون من السهل الحصول على الأخرى .

مثال توضيحي ٩ - ٥ : « وزنت » قطعة من الصخر فوجد أن « وزنها » 9.173 g ثم « وزنت » مرة أخرى عندما كانت مغمورة في سائل كثافته 873 kg/m^3 فوجد أن قيمة « وزنها » 7.261 g . اوجد كثافة مادة الصخرة .
ملحوظة : وضعت علامتي الاقتباس حول كلمتي « ونت » و « وزنها » لأن هذا الاستخدام دارج وليس علميا .

طريقة الحل : نعلم أن كتلة الجسم هي $m_0 = 9.173 \times 10^{-3} \text{ kg}$ ولإيجاد حجم الجسم نستخدم حقيقة أن :

$$BF = V_0 D_f = V_0 (873 \text{ kg/m}^3) (9.8 \text{ m/s}^2)$$

ولكن :

$$BF = (9.173 \times 10^{-3} \text{ kg} - 7.261 \times 10^{-3} \text{ kg}) (9.8 \text{ m/s}^2)$$

وبالتعويض نحصل على :

$$V_0 = \frac{9.173 - 7.261}{0.873} \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 2.190 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

وحيث أن $d = m/V$ ، إذن :

$$d_0 = \frac{9.173 \times 10^{-3} \text{ kg}}{2.19 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 4190 \text{ kg/m}^3$$

مثال توضيحي ٩ - ٦ : وجد أن جسما ما « يزن » 24 g في الهواء و 16 g عندما كان مغمورا في الماء و 12 g فقط عندما كان مغمورا في سائل من نوع معين ماهي كثافة السائل ؟

طريقة الحل : حيث أن $(BF)_w = V_0 D_w$ إذن :

$$V_0 = \frac{(0.024 \text{ kg} - 0.016 \text{ kg}) (9.8 \text{ m/s}^2)}{(1000 \text{ kg/m}^3) (9.8 \text{ m/s}^2)} = 8.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 8.0 \text{ cm}^3$$

حيث يشير الدليل السفلي w الى الماء . وهذا هو ايضا حجم السائل المزاح V_f
ولكن وزن السائل المزاح W_f يساوى BF عندما يكون الجسم مغمورا في السائل :

$$W_f = (0.024 \text{ kg} - 0.012 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)$$

وحيث أن $D_f = W_f/V_f$ ، إذن :

$$D_f = \frac{(0.024 \text{ kg} - 0.012 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)}{8.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 14,700 \text{ N/m}^2$$

وإيضا ، حيث أن $d_f = D_f/g$ إذن :

$$d_f = \frac{14,700 \text{ N/m}^2}{9.8 \text{ m/s}^2} = 1500 \text{ kg/m}^3$$

٩ - ١١ البارومتر (مقياس الضغط)

لنعد الآن الى مناقشة ضغط المائع وتأثيراته . يعتبر الهواء المحيط بنا مائعا هاما جدا ، اذ أن الضغط في داخله ذو أهمية كبيرة لنا ، وسنرى أن الضغط الجوي متغير مؤثر في عمليات كثيرة . وسوف نناقش في هذا الجزء طرق قياس الضغط الجوي .

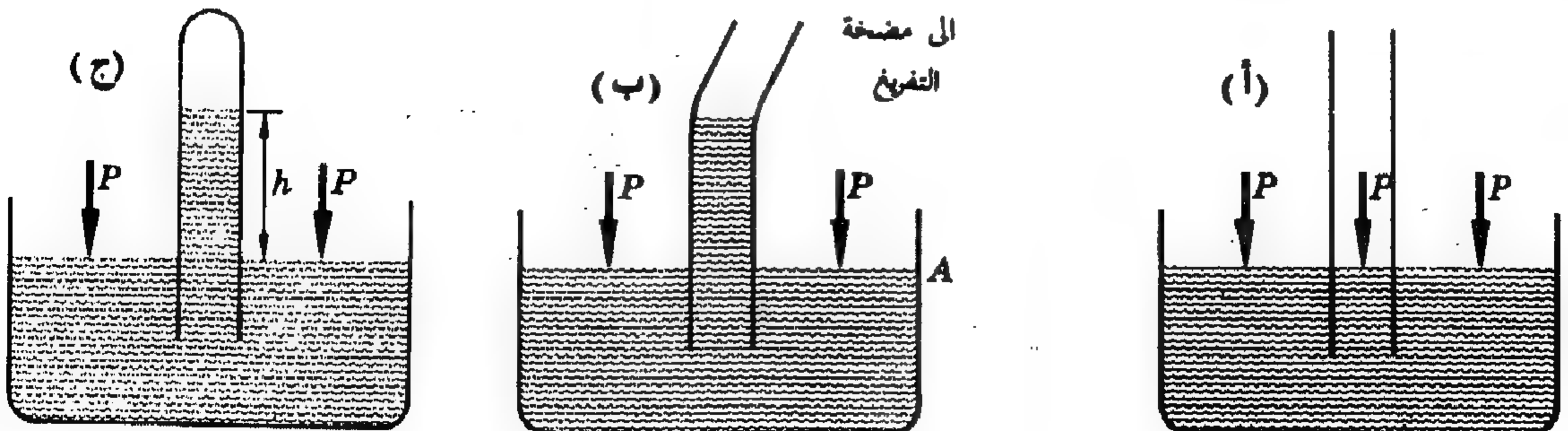
من المعروف لنا جميعا أن الضغوط البارومترية المتزايدة تسبق عادة الجو الحسن ، بينما تعتبر الضغوط البارومترية المتناقصة أو المنخفضة من مميزات الجو السيء .

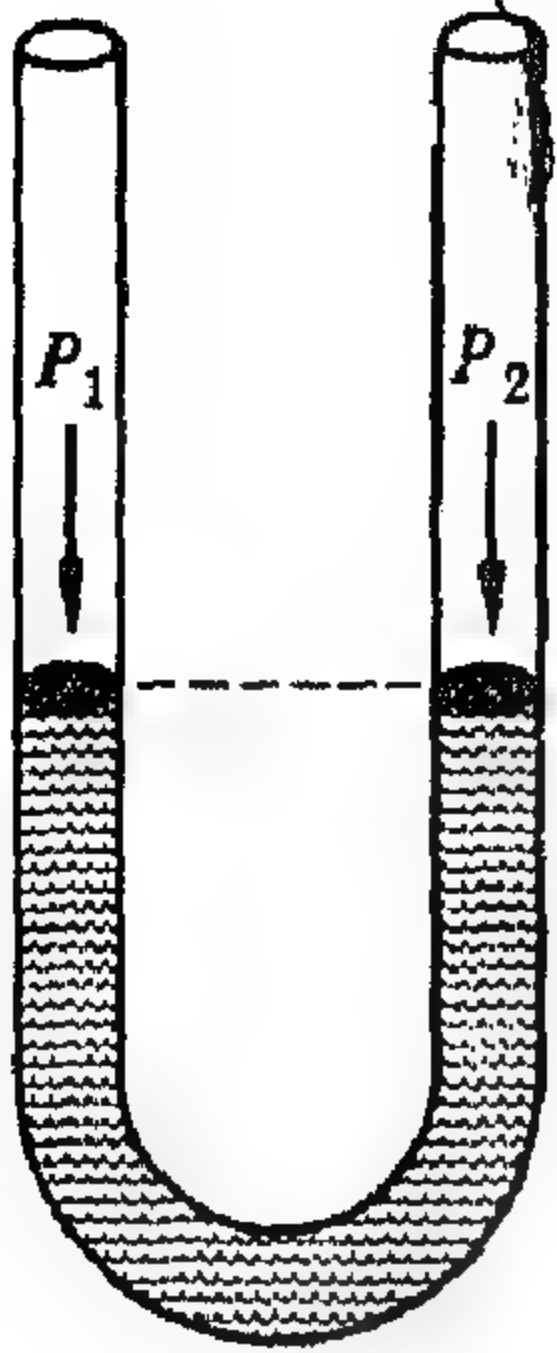
ويذكر الضغط البارومتري اليومي في كثير من التقارير الجوية ، وهو واحد من البيانات الأساسية في التنبؤ الجوي . والضغط البارومتري ليس مهما في هذا التطبيق فقط ، ولكنه يستخدم أيضا في اغراض كثيرة أخرى . فمثلا ، تتغير درجة غليان السوائل بتغير الضغط الجوي ، ولهذا نحتاج الى معرفة الضغط البارومتري عادة في المختبرات-لنفحص الآن عمل البارومتر .

اعتبر الموقف المبين في الشكل ٩ - ١٨ أ الذي يمثل كأسا مملوءة بالزئبق وأنبوبة زجاجية مفتوحة منغمسة فيه . وحيث أن سطحى الزئبق داخل الأنبوبة وخارجها مفتوحان على الهواء فإن ضغطى الهواء عليهما متساويان . وينشأ ضغط الهواء نتيجة لوزن الهواء الموجود فوق الأرض .

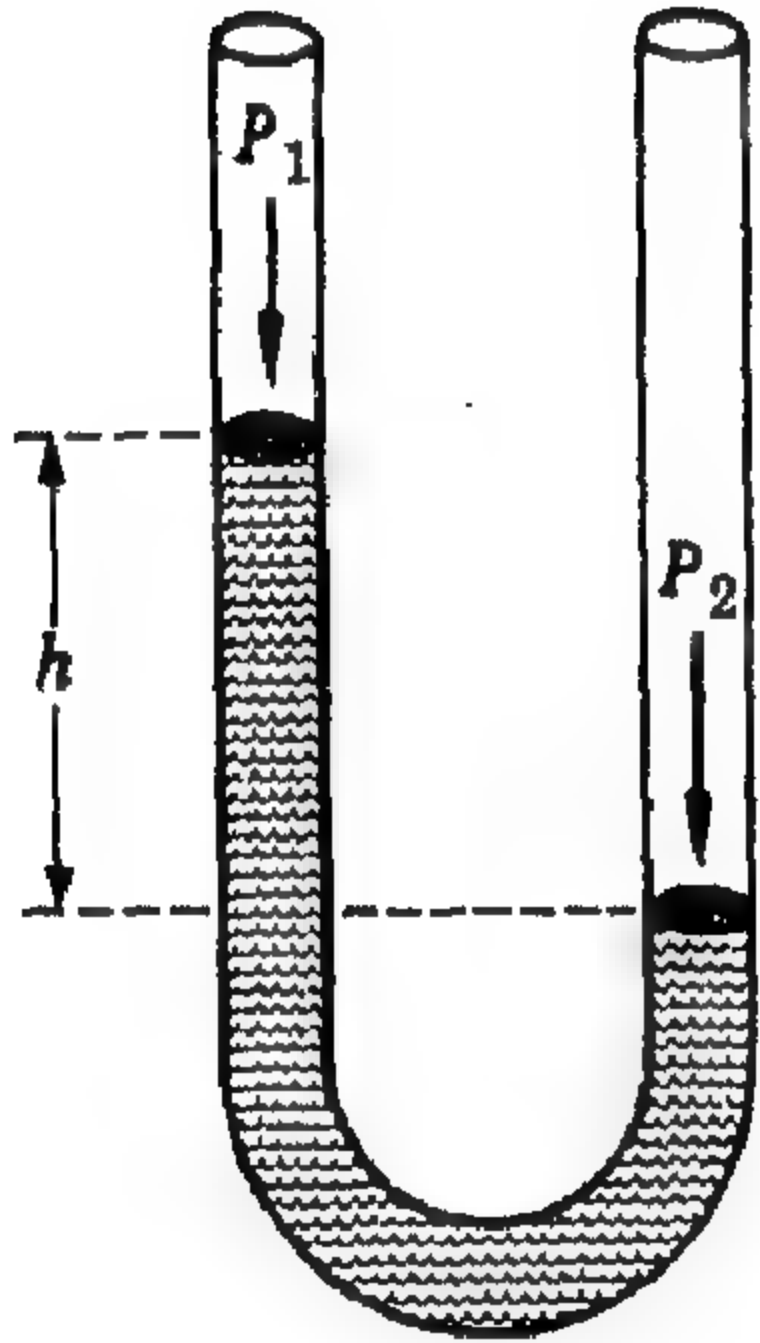
شكل (٩ - ١٨)

عندما تفرغ الأنبوبة يوتفع الزئبق بداخلها حتى تتحقق العلاقة $hD = P$ ومن ثم فإن هذا الجهاز ، البارومتر ، قادر على قياس الضغط .





(أ)



(ب)

شكل (٩ - ١٩)

في المانومتر يقاس فرق الضغط $P_2 - P_1$ بالارتفاع h .

وإذا وصلت مضخة تفريغ مثالية بطرف الأنبوبة كما هو مبين في الشكل ٩ - ١٨ ب فإن المضخة سوف تفرغ الأنبوبة من الهواء ، وبذلك يقل الضغط على سطح الزئبق بداخلها الى الصفر . (تذكر أن ضغط الغاز على سطح ينشأ نتيجة لتصادم جزيئات الغاز بهذا السطح . وإذا لم تكن الجزيئات موجودة فمن الواضح أن الضغط سيكون صفراً . وهذا مانع من الفراغ المثالي) ، والآن أصبحت هناك قوة غير متزنة تؤثر على سطح الزئبق وتحاول أن ترفع الأنبوبة إلى أعلى . عندئذ سيرتفع الزئبق في الأنبوبة إلى ارتفاع معين حيث يكون الضغط عند المستوى A نتيجة لعمود الزئبق مساوياً للضغط الجوي P ، وهذا صحيح لأن الضغط على مستوى معين في السائل يجب أن يكون متساوياً في كل مكان ، وإلا تدفق السائل حتى يتساوى الضغط .

وفي النهاية تسد الأنبوبة المفرغة بأحكام كما هو مبين في الشكل ٩ - ١٨ ج بحيث يظل الضغط عند قاعدة عمود الزئبق يساوي الضغط الجوي بالضبط ، فإن :

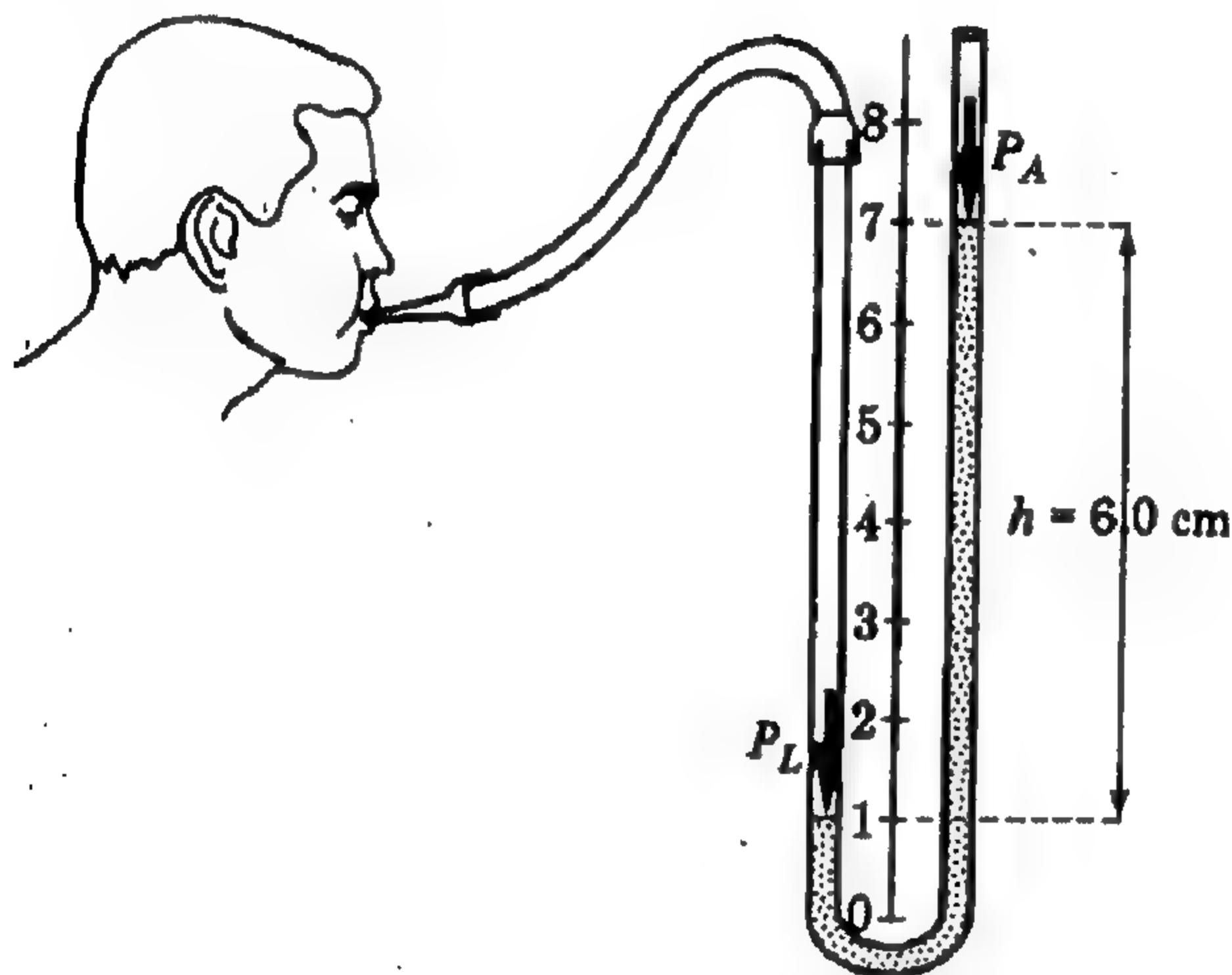
$$P = hD = hdg$$

وحيث أن كثافة الزئبق D معلومة ، فيمكننا إيجاد الضغط الجوي بسهولة بقياس ارتفاع عمود الزئبق اللازم للتوازن مع الضغط الجوي . وفي الحقيقة ، يعبر عن الضغط في أحيان كثيرة جداً بعدد البوصات أو الستيمترات من الزئبق . فالضغط الجوي العياري يساوي 760 mm. Hg وبالطبع فإن هذا الضغط هو في الحقيقة $hdg = (0.76)(13,600)(9.8) \text{ N/m}^2 = 1.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ لماذا ؟ حيث أن 1 in تساوي 2.54 cm ، 760 mm Hg تكافئ حوالي 30 in Hg .

والبارومترات الزئبقية التجارية ماهي إلا صور محسنة من الجهاز المبين في الشكل ٩ - ١٨ ج ، فهي مزودة بمقياس دقيق بجانب عمود الزئبق وأجهزة خاصة لضبط مستوى الزئبق في الكأس . ومع ذلك فإنها أساساً كما هو مبين في الشكل . وهناك أنواع أخرى من البارومترات مبنية على أسس مختلفة ، ولكن البارومتر الزئبقي يفضل في القياسات الدقيقة . ومع ذلك فإن طول البارومتر الزئبقي لا يجب أن يقل عن 760 mm ، ولهذا يكون من المنطقي أحياناً استبداله بجهاز آخر أصغر ولكن أقل منه دقة .

هناك جهاز آخر يستخدم لقياس ضغوط الغازات بدقة ويسمى المانومتر (شكل ٩ - ١٩) . وبالرغم من أن هناك طرازات عديدة من المانومترات فإن المانومتر هو أساساً أنبوبة على شكل الحرف U مملوءة جزئياً بسائل كالزئبق . وإذا كان سطحى الزئبق في الأنبوبتين في مستوى واحد كما هو مبين في الجزء أ ، فإن هذا يعنى أن ضغطى الغازين الموجودين فوق العمودين P_1 و P_2 لابد أن يكونا متساويين . وإذا كان

P_2 اكبر من P_1 فإن ارتفاعى عمودى الزئبق سيتغيران ليصبحا كما هو مبين فى الجزء ب . وفى هذه الحالة يعطينا الفرق بين ارتفاعى العمودين h مقاسا بالسنتيمترات فرق الضغط $P_2 - P_1$ مقدرا بالسنتيمترات من الزئبق . وعادة يكون احد العمودين مفتوحا على الجو ، ولنفرض أن P_1 هو الضغط الجوى . عندئذ يكون P_2 هو الضغط المانومتري مضافا اليه h . وفى حالة الفروق الصغيرة فى الضغط يكون من المناسب استخدام سائل أقل كثافة من الزئبق . فإذا استخدم سائل كثافته d بدلا من الزئبق فإن الفرق بين مستويى سطحيه فى الأنبوبتين سوف يزداد بمقدار $13,600/d$ ، حيث d مقاسة بالكيلوجرامات لكل متر مكعب . هل يمكن أن تشرح لماذا ؟



شكل (٩ - ٢٠)
بالنفخ فى المانومتر يستطيع
الشخص أن يحمل عمودا
من المائع ارتفاعه
6.0 cm Hg . ماهى قيمة
 P_L ؟

مثال توضيحي ٩ - ٧ : فى أحد الاختبارات البسيطة للرئتين يطلب من المريض أن ينفخ بكل قوته عمود الزئبق فى إحدى أنبوتى المانومتر كما هو مبين فى الشكل ٩ - ٢٠ . افترض ان المانومتر الزئبقى قد استخدم فى حالة معينة ، وأن مستويى السائل فى أنبوتى المانومتر كانا كما بالشكل . ماقيمة الضغط داخل رئتى المريض . (لاستخدم الزئبق عادة فى مثل هذا الاختبارات لأن بخار الزئبق خطير عند تكرار التعرض إليه) :
طريقة الحل : لنفرض أن P_L هو ضغط الهواء فى الرئتين . الضغط فى الجانب الأيسر للمانومتر قريب جدا من P_L وهذا الضغط يتزن مع الضغط الجوى مضافاً إليه الضغط الناتج من العمود $h = 6.0 \text{ cm Hg}$. إذن :

$$P_L = 6.0 \text{ cm Hg} + P_A$$

وعادة يكون P_A حوالى 76 cm Hg ، ومن ثم فإن $P_L = 82 \text{ cm Hg}$. (وبالطبع يجب قياس P_A باستخدام البارومتر إذا أريد الحصول على نتيجة دقيقة) . وحيث أن ضغط عمود من المائع ارتفاعه h هو hdg فإن :

$$P_L = 82 \text{ cm Hg} = (0.82 \text{ m})(13,600 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2) \\ \Rightarrow 1.093 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.08 \text{ atm}$$

وقد أعطيت تحويلات وحدات الضغط من صورة إلى أخرى في جدول معاملات التحويل في بطن الغلاف الأمامي .

٩ - ١٢ الموائع المتحركة

ناقشنا حتى الآن الموائع الساكنة ، ولكن الموائع المتحركة هامة بدرجة كبيرة أيضا . ويمكنك أن تعلم الكثير عن ذلك بفحص انسياب الموائع خلال المواسير . ويمثل الشكل ٩ - ٢١ السلوك النموذجي للموائع المتحركة .

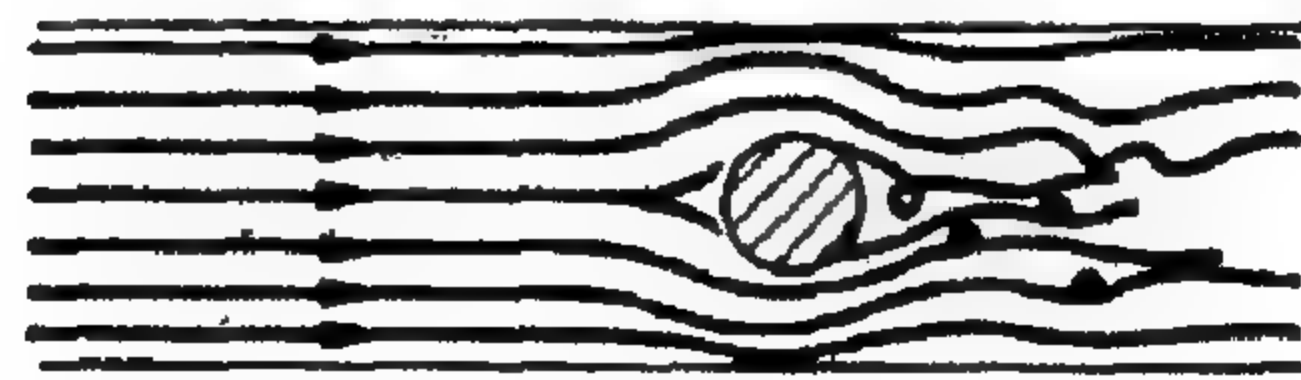
نرى من الجزء أ من الشكل أن المائع لا يتحرك في الماسورة ببساطة ككتلة واحدة ، وبدلاً من ذلك نلاحظ أن المائع القريب من جدران الماسورة يتحرك ببطء شديد للغاية . وواضح أيضاً من جانبية السرعات أن المائع القريب من مركز الماسورة يتحرك بأكبر سرعة . وهذا التغير في السرعة عبر مقطع الماسورة يسبب احتكاك المائع القريب من مركز الماسورة بالجزء الخارجى من المائع . نتيجة لذلك يحدث فقدان احتكاكى للطاقة في عملية الانسياب ، وستتکلم عن ذلك بشكل أكثر تفصيلاً فيما بعد .



(أ)



(ب)



(ج)

شكل (٩ - ٢١)
أمثلة للمائع المتحرك
للانسياب في أنبوبة :
(أ) جانبية السرعات .
(ب) الخطوط الانسيابية ،
(ج) الدفع المضطرب .

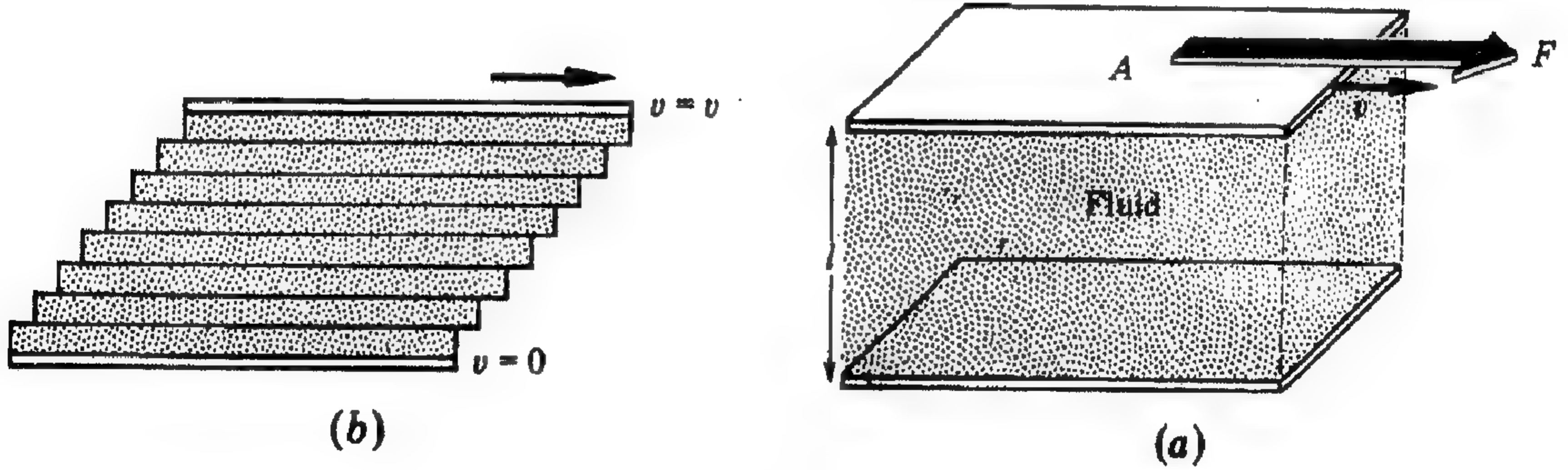
يوضح الجزء ب من الشكل الخطوط الانسيابية في حالة الانسياب البسيط . وهذه الخطوط تبين المسار الذى يتبعه جسيم دقيق في المائع أثناء حركته في الماسورة . ويسمى هذا النوع من الانسياب بالانسياب الطبقي .

لاحظ أيضا في هذا الشكل أن سرعة الانسياب تتغير بتغير مساحة المقطع ، وتكون سرعة المائع أقل في المنطقة ذات المقطع الكبير .

ويوضح الجزء جـ من الشكل ما يحدث إذا أصبح الانسياب سريعا جدا عند مرور المائع بعائق ما ، وفي هذه الحالة لن تكون الخطوط الانسيابية ملساء كما في الحالة السابقة . وعندما يندفع المائع على العائق فإنه يبدأ في التحرك حركة دوامية عشوائية ، ولهذا لن يمكننا التنبؤ بالمسار الحقيقي الذي يتبعه جسم صغير في المائع . ويقال عندئذ أن هذه المنطقة التي تتغير فيها الخطوط الانسيابية باستمرار هي منطقة تدفق مضطرب . وكما قد تتوقع ، كمية الطاقة المفقودة نتيجة للتأثيرات الاحتكاكية أكبر كثيرا في حالة التدفق المضطرب منها في حالة الانسياب الطبقي . ويجب أن نشير هنا إلى أن التدفق المضطرب يحدث أيضا في الأنبوبة المنتظمة حتى إذا لم يكن العائق موجودا ، بشرط أن يكون معدل الدفع كبيرا بدرجة كافية .

٩ - ١٣ اللزوجة

رأينا في الجزء السابق أن التأثيرات الاحتكاكية تحدث في المائع المتدفق ، ويوصف هذا التأثير بدلالة لزوجة المائع . وتعتبر اللزوجة مقياسا لمقدار القوة اللازمة لانزلاق طبقة من السائل على طبقة أخرى . والمواد التي لاتنسب بسهولة ، وهي المواد الغليظة جدا كالقار أو الشراب المركز ، لزوجتها كبيرة . أما المواد التي تنسب بسهولة (كالماء) فلزوجتها صغيرة .



لكي نعطي معنأ كميأ للزوجة سنستعين بتجربة القص التخيلية الموضحة في الشكل ٩ - ٢٢ . ونحن نرى في هذا الشكل لوحين متوازيين مساحة كل منهما A تفصلهما مسافة قدرها l . لنفرض أن المنطقة بين اللوحين مملوءة بمائع نرمز إلى لزوجته بالرمز η (الحرف اليوناني إيتا) . لكي نتمكن من تحريك اللوح العلوي بسرعة قدرها v بالنسبة للوح السفلي نلزمنا قوة معينة . وبالطبع فإن هذه القوة ستكون كبيرة إذا كانت لزوجة المائع كبيرة . تعرف η بالعلاقة التالية :

شكل (٩ - ٢٢)
عندما يتحرك اللوح العلوي
تنزلق طبقات المائع بعضها
فوق بعض .

$$\eta = \left(\frac{F}{A}\right)\left(\frac{l}{v}\right) \quad (9 - 11) \text{ اللزوجة}$$

وحدات اللزوجة في النظام SI طبقا للمعادلة (9 - 11) هي النيوتن ثانية لكل متر مربع . ومع ذلك فإن η تدرج في الجداول في أحيان كثيرة بدلالة وحدة تسمى بويز (P) . وترتبط هذه الوحدة بوحدة اللزوجة في النظام SI بالعلاقة :

$$1 \text{ SI viscosity unit} = 1 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$$

ويستنتج البويز من المعادلة (9 - 11) عند استخدام النظام cgs ويمثل الجدول 9 - 3 بعض قيم اللزوجة لموائع معروفة .

جدول 9 - 3

لزوجة بعض السوائل والغازات عند 30°C .

المادة	اللزوجة* cP
هواء	0.019
اسيتون	0.295
كحول ميثيل (ميثانول)	0.510
بنزين	0.564
ماء	0.801
كحول ايثيل (إيثانول)	1.00
بلازما الدم	~1.6
زيت SAE No.10	200
جلسرين	629
جلوكوز	6.6×10^{13}

وحدة اللزوجة في النظام SI هي $1 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 1000 \text{ cp}$.

يمكننا التعرف على معنى اللزوجة بصورة أكثر وضوحا بفحص الشكل 9 - 22 ب . لاحظ أن طبقتي المائع الملاصقتين للوحين تظلان ملتصقتين بهما . ويمكننا اعتبار أن المائع الموجود بين اللوحين مكون من كثير من الطبقات الرقيقة ، أكثر كثيرا مما هو مبين . وعندما يتحرك اللوح العلوي تنزلق هذه الطبقات كل منها على الأخرى ويكون الانزلاق صعبا إذا كانت لزوجة المائع كبيرة . وعندما تنزلق الطبقات على بعضها البعض تبذل كمية كبيرة من الشغل . ولهذا السبب فإن الشغل المبذول ضد قوى اللزوجة يكافئ شغل الاحتكاك .

9 - 14 قانون بوازيل

من المفيد في كثير من الأحيان معرفة حجم المائع الذي ينساب خلال ماسورة في وحدة الزمن . وتعرف هذه الكمية باسم معدل التدفق وسنرمز لها هنا بالرمز Q . من التعريف :

$$Q = \text{الحجم المنساب من الأنبوبة في الثانية}$$

لنرجع الى الشكل ٩ - ٢٣ لتبين كيف يعتمد Q على المتغيرات الموضحة في هذا الشكل .

من المعقول أن نعتقد أن المائع ينساب بمعدل أكبر إذا كان فرق الضغط $(P_1 - P_2)$ كبيرا ، ولهذا يمكننا أن نقول أن Q يتناسب مع الضغط الدافع $(P_1 - P_2)$. وكلما ازداد طول الماسورة كلما زادت مقاومتها للانسياب . إذن Q يجب أن يتناسب عكسيا مع L . ولكن معدل التدفق يجب أن يزداد بزيادة مقطع الماسورة ، وعليه فإن Q يجب أن يزيد بزيادة R . وفي النهاية ، كلما كانت اللزوجة η كبيرة كلما كان معدل التدفق صغيرا .

كان بوازيل (الذي سميت وحدة اللزوجة نسبة إليه) أول من أوجد العلاقة الرياضية المضبوطة لمعدل التدفق Q بدلالة $P_1 - P_2$ ، L ، R ، η . وقد أثبت أن Q في حالة الانسياب الطبقي المائع في ماسورة طولها L ونصف قطرها R يعطى بالعلاقة :

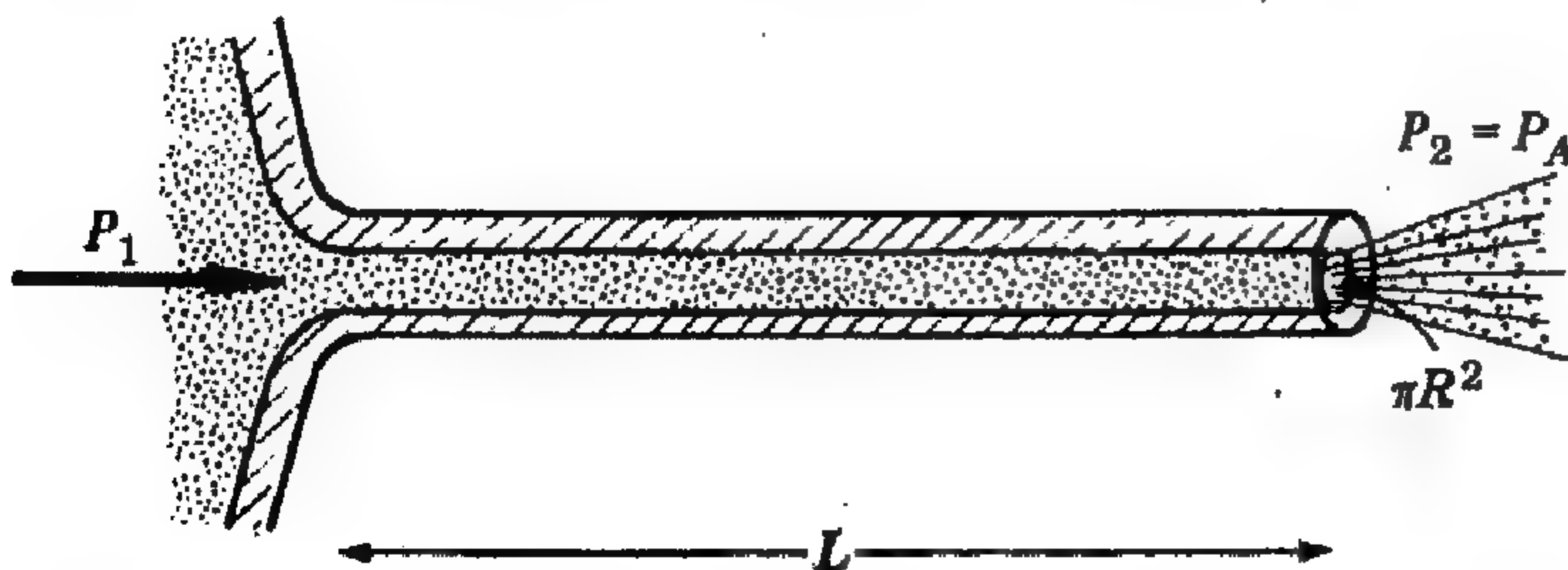
$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8 \eta L} \quad (9 - 12)$$

وتسمى هذه العلاقة قانون بوازيل . لاحظ أن Q يتناسب مع نصف قطر الماسورة R مرفوعا إلى الأس الرابع .

مثال توضيحي ٩ - ٨ : لزوجة الماء تساوي (centipoise) 0.801 عند 30°C ، ماهي كمية الماء المناسبة في كل ثانية خلال أنبوبة شعيرية طولها 20 cm ونصف قطرها 0.15 cm إذا كان فرق الضغط عبر الأنبوبة 3.0 cm Hg ؟
طريقة الحل : لدينا الكميات المعلومة الآتية :

$$\begin{aligned} L &= 0.20 \text{ m} & R &= 0.15 \times 10^{-2} \text{ m} \\ \eta &= 0.801 \text{ cP} = 0.801 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 \\ P_1 - P_2 &= 3.0 \text{ cm Hg} = \left(\frac{3.0}{76}\right)(1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2) = 0.40 \times 10^4 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

اجريت عملية تحويل وحدات الضغط هنا باعتبار أن $1 \text{ atm} = 76 \text{ cm Hg} = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ بالتعويض عن هذه الكميات في المعادلة (٩ - ١٢) نجد أن :



شكل (٩ - ٢٣)
يتناسب معدل التدفق مع $(P_1 - P_2)R^4/\eta L$ طبقا لقانون بوازيل .

$$Q = 5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 50 \text{ cm}^3/\text{s}$$

مثال توضيحي ٩ - ٩ . يتركب مقياس اللزوجة الشعري من أنبوبة شعرية رأسية تتساب خلالها كمية ثابتة من السائل ويقاس زمن انسيابها . وقد وجد أن زمن انسياب البنزين في مقياس لزوجة معين هو 206.3 s عند 30°C بينما كان زمن انسياب محلول مخفف جدا من البنزين هو 309.7 s عند نفس درجة الحرارة . أوجد لزوجة المحلول .

طريقة الحل : كثافة المحلول المخفف قريبة جدا من كثافة البنزين . ومن ثم فإن الضغط الحافز سيكون واحدا بالنسبة للمحلول والمذيب . وطبقا لقانون بوازيل نرى أن العامل الوحيد الذي يؤثر على Q الذي يختلف في التجريبتين هو اللزوجة η إذن:

$$\frac{\text{زمن انسياب المذيب}}{\text{زمن انسياب المحلول}} = \frac{\eta \text{ للمذيب}}{\eta \text{ للمحلول}}$$

من الجدول ٩ - ٣ نجد أن لزوجة البنزين عند 30°C هي 0.564 cp . إذن ، بالتعويض عن الكميات المعروفة نجد أن :

$$\frac{206.3}{309.7} = \frac{0.564 \text{ cp}}{\eta \text{ للمحلول}}$$

$$\eta \text{ للمحلول} = 0.847 \text{ cp}$$

مثال توضيحي ٩ - ١٠ : يتعرض المسنون كثيرا لمشاكل متعلقة بدوران الدم نتيجة لتراكم الزواشب في الشرايين ، بأي معامل يقل معدل انسياب الدم إذا نقص نصف قطر الشريان ، إلى النصف ؟ افترض تساوى فرق الضغط في الحالتين .

طريقة الحل : نجربنا قللنا بوازيل أن حجم الدم Q المتساب خلال الشريان في الثانية يرتبط بنصف قطره R طبقا للعلاقة :

$$Q \propto R^4$$

وعليه فإن Q_0 (ثابت) $\propto (R_0^4)$ بالنسبة للشريان الأصلي . بينما Q (ثابت) $\propto (R/2)^4$ بالنسبة للشريان الضيق . من هاتين المعادلتين نجد أن $Q/Q_0 = 1/16$ أى أن معدل الانسياب يقل بمعامل قدره 16 . وواضح من حقيقة أن Q يعتمد بشدة على R لماذا تنشأ مشاكل دوران الدم من رواسب الشرايين .

٩ - ١٥ معادلة برنولي للسوائل المتحركة

رأينا مما سبق أن لكل سائل لزوجة مميزة . وإذا كانت اللزوجة كبيرة يكون من الضروري بذل شغل كبير لدفع السائل في الماسورة ، وتفقد هذه الطاقة نتيجة لاحتكاك الجزيئات بعضها ببعض في السائل ، وتظهر هذه الطاقة المفقودة في نهاية الأمر على هيئة حرارة .

وتمتاز بعض السوائل بأن لزوجتها صغيرة لدرجة يمكن معها إهمال الطاقة المفقودة نتيجة للتأثيرات الاحتكاكية ، على الأقل في حالات معينة . وفي هذه الحالة الهامة يمكن إيجاد علاقة بسيطة للضغط في المائع ، وتسمى هذه العلاقة معادلة برنولي التي نشرها دانييل برنولي في عام ١٧٣٨ .

اعتبر الماسورة المبينة في الشكل ٩ - ٢٤ والمملوءة تماما بسائل بين كباسين لاحتكاكيين . وافترض أن الكباس السفلي يدفع إلى اليمين بسرعة ثابتة قدرها v_1 وأن الكباس العلوي يتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها v_2 . في هذه الحالة تتزن القوة المؤثرة على الكباس السفلي F_1 مع القوة الناتجة من ضغط السائل $P_1 A_1$ حيث A_1 مساحة الكباس السفلي . (لابد أن تتعادل القوتان المؤثرتان على الكباس وإلا تسارع هذا الكباس ، وقد ذكرنا سابقا أنه يتحرك بسرعة ثابتة) . بالمثل $F_2 = P_2 A_2$ بالنسبة إلى الكباس العلوي . وحيث أن المسافة التي يتحركها الكباس السفلي في زمن قدره t هي $v_1 t$ ، إذن حجم السائل الذي يدفعه هذا الكباس هو $(v_1 t)(A_1)$. وإذا كان السائل لا ينضغط فإن الكباس العلوي يجب أن يفسح مكانا لحجم مساو من السائل . إذن :

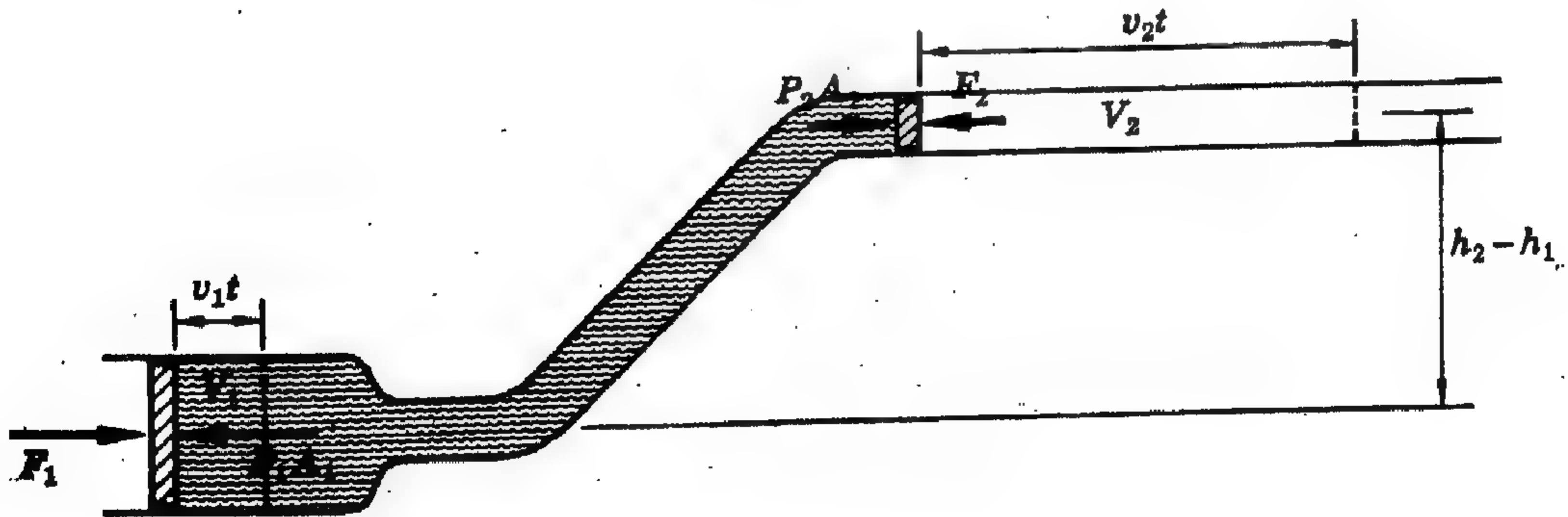
$$(v_1 t)(A_1) = (v_2 t)(A_2)$$

وقد تساءل برنولي عما يحدث للشغل بواسطة الكباس 1 وهذا الشغل يساوى بالطبع $F_1(v_1 t)$ أو :

$$P_1 A_1 v_1 t = \text{شغل الدخول}$$

شكل (٩ - ٢٤)

الشغل المبذول بواسطة F_1 يجب أن يكون مساويا للشغل المبذول ضد القوة F_2 مضافا إليه التغير في طاقة حركة السائل وطاقة وضعه .



لأن $P_1 A_1 = F_1$. وحيث أن الكباس 2 يبذل كمية من الشغل قدرها $F_2(v_2 t)$ فإن جزءا من شغل الدخول قد انتقل إلى هذا الكباس .

بالإضافة إلى ذلك فإن السائل الذى يدفعه الكباس إلى اليمين ينتقل بالطبع إلى الأنبوبة العلوية . ونتيجة لذلك يكتسب هذا السائل (وحجمه $A_1 v_1 t$) كمية معينة من طاقة الوضع . علاوة على ذلك حيث أن السائل يتحرك الآن ، بسرعة أكبر هي v_2 ، فإن طاقة حركته سوف تتغير أيضا . وبالطبع يفقد بعض الطاقة كشغل احتكاك اللزوجة في هذه العملية ، ولكننا نفترض أن هذا الجزء صغير ويمكن إهماله . إذن :

التغير في طاقة الحركة + التغير في طاقة الوضع + شغل الخرج = شغل الدخول .
أو ، باستخدام رموز الشكل ٩ - ٢٤ :

$$P_1 A_1 v_1 t = P_2 A_2 v_2 t + Mg(h_2 - h_1) + (\frac{1}{2} M v_2^2 - \frac{1}{2} M v_1^2)$$

ولكن حجم السائل المعنى هو $A_1 v_1 t$ ولهذا فإن كتلته يمكن إيجادها من تعريف الكثافة . إذن كتلة السائل :

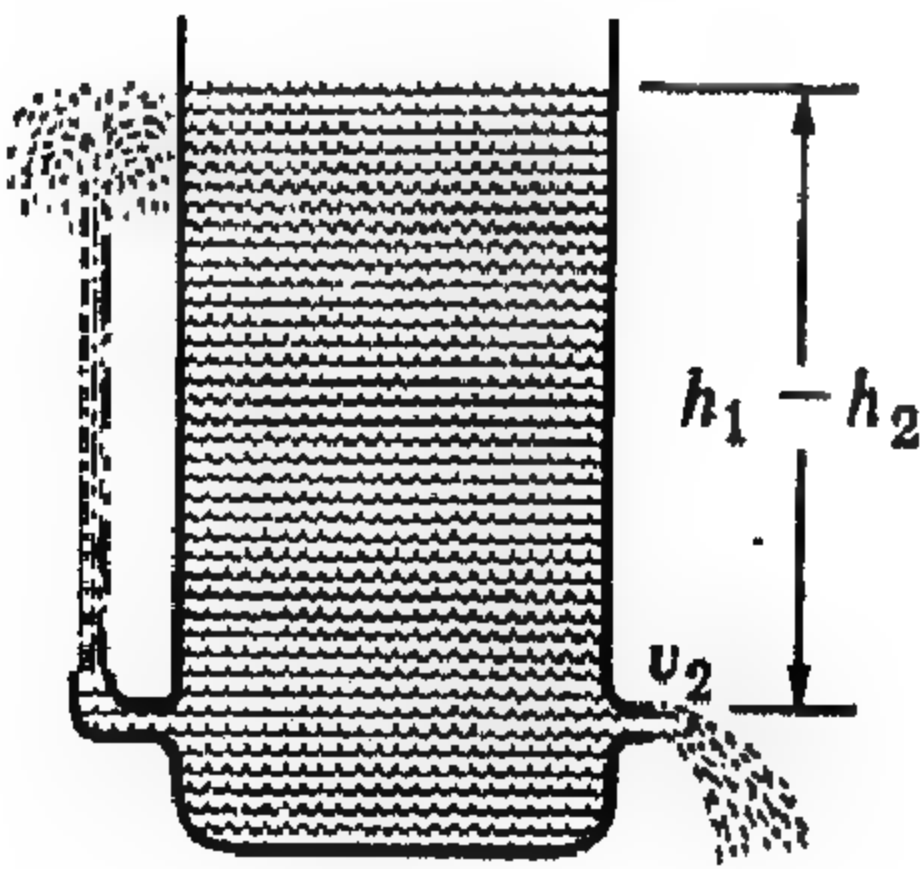
$$M = d A_1 v_1 t = d A_2 v_2 t$$

وبالتعويض عن كتلة السائل في المعادلة السابقة وإعادة ترتيب حدودها نحصل على المعادلة التالية :

معادلة
برنولى

$$P_1 + \frac{1}{2} v_1^2 d + g h_1 d = P_2 + \frac{1}{2} v_2^2 d + g h_2 d$$

وهذه هي معادلة برنولى . وواضح أنه من غير الضرورى وجود الكباسين ، فالنقطتان 1 و 2 يمكن أن تكونا أي نقطتين في السائل . وكل ما نحتاجه هو سطحين في السائل ، وقد يكون هذان السطحان تخيليين ، ولكن الحسابات ستظل واحدة دون أى تغيير . لاحظ ، مع ذلك ، أن هذه المعادلة تنطبق إذا كان من الممكن إهمال فواقد الاحتكاك فقط .



٩ - ١٦ نظرية توريشلى

مثال توضيحي ٩ - ١١ . يمثل الشكل ٩ - ٢٥ تطبيقا بسيطا لمعادلة برنولى . افترض أن هناك ذيل ماسورة صغيرة في خزان كبير من السائل كما هو مبين . لإيجاد السرعة التى ينساب بها الماء من ذيل الماسورة الأيمن .

شكل (٩ - ٢٥)
تستخدم نظرية توريشلى
لإيجاد سرعة تدفق سائل من
ذيل ماسورة .

طريقة الحل : حيث أن ذيل الماسورة صغير جدا ، فإن سرعة التدفق v_2 ستكون أكبر كثيرا من سرعة السطح العلوى للماء v_1 . يمكننا إذن تقريب v_1 واعتبارها صفرا . وعليه يمكننا إذن كتابة معادلة برنولى كالتالى :

$$P_0 + gh_1d = P_0 + \frac{1}{2}v_2^2d + gh_2d$$

$$P_1 \approx P_2 = P_0 = \text{الضغط الجوى}$$

بإعادة ترتيب حدود هذه المعادلة نحصل على :

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

نظرية
توريشلى

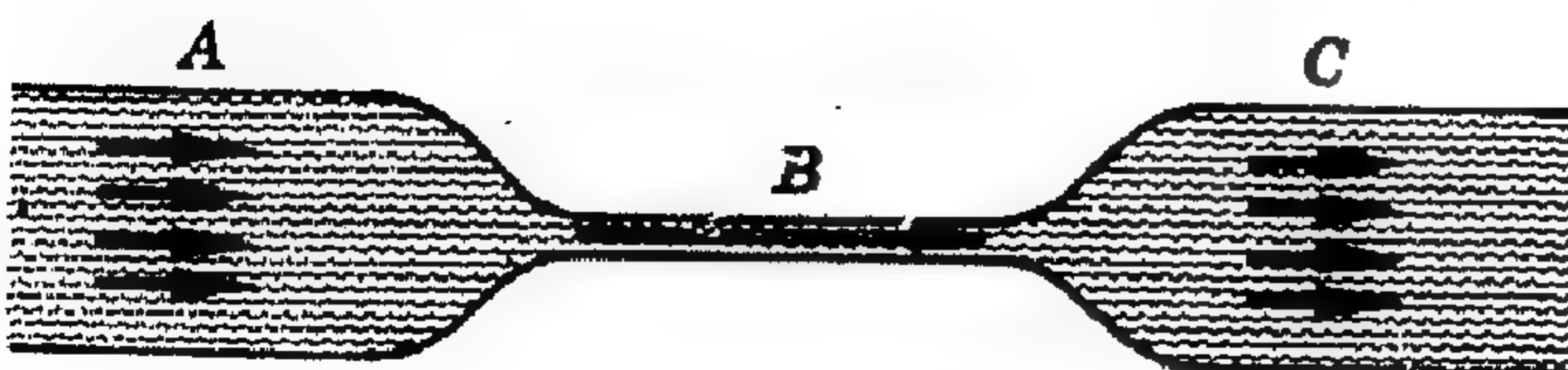
وهذه هى نظرية توريشلى . لاحظ أن سرعة تدفق السائل تساوى سرعة كرة تسقط من ارتفاع قدره $h_1 - h_2$ وهذا يوضح حقيقة أنه عندما ينساب قليل من السائل من ذيل الماسورة فإن هذا يحدث كما لو أننا قد أخذنا نفس الكمية من السائل من السطح العلوى للخزان واسقطناها إلى مستوى ذيل الماسورة . وبالطبع يهبط مستوى سطح الخزان بمقدار معين . وتتحول طاقة الوضع المفقودة إلى طاقة الحركة للسائل المتدفق . فإذا وجه ذيل الماسورة إلى أعلى كما فى يسار الشكل ٩ - ٢٥ فإن طاقة الحركة سوف تسمح للسائل بالارتفاع إلى المستوى المين قبل السقوط . وعمليا تؤدي فواقد طاقة اللزوجة إلى تغيير النتيجة بعض الشيء .

٩ - ١٧ تطبيقات أخرى لمعادلة برنولى

مثال توضيحي ٩ - ١٢ : افترض أن الماء ينساب خلال انبوبة كالمبينة فى الشكل ٩ - ٢٦ . من الواضح أن انسياب الماء عند B أكبر منه عند A أو C . بفرض أن سرعة الانسياب هى 0.20 m/s عند A ، 2.0 m/s عند B ، قارن الضغط عند B بالضغط عند A .

طريقة الحل : بتطبيق معادلة برنولى وملاحظة أن متوسط طاقة الوضع ثابت فى هذين المكانين نجد أن :

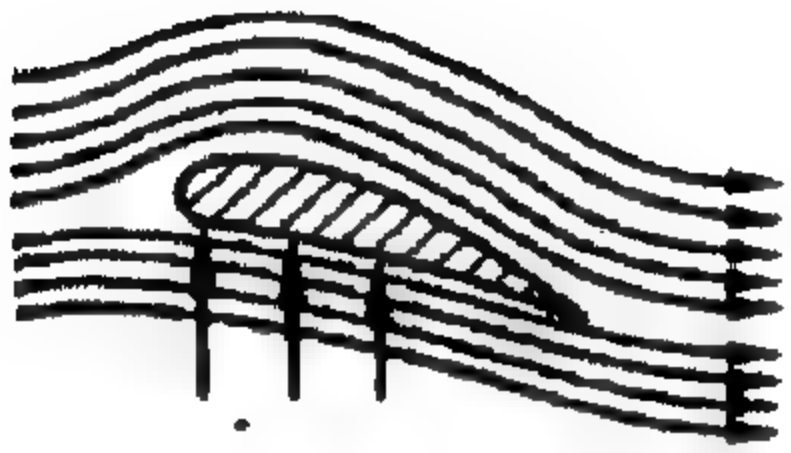
$$P_A + \frac{1}{2}v_A^2d = P_B + \frac{1}{2}v_B^2d$$



شكل (٩ - ٢٦)
حيث أن سرعة المائع أكبر مايمكن عند B فإن الضغط يكون أقل مايمكن عند هذه النقطة .

وبالتعويض عن $v_A = 0.20 \text{ m/s}$ ، $v_B = 2.0 \text{ m/s}$ ، $d = 1000 \text{ kg/m}^3$ نجد أن $P_A - P_B = 1980 \text{ N/m}^2$. ومن ثم فإن ضغط المائع في الاختناق اقل كثيرا منه في الماسورتين الكبيرتين الموجودتين على جانبيه . وربما كان هذا عكس ما قد يتوقعه المرء أولا . ومع ذلك فإن هذا صحيحا وله تطبيقات واسعة فمثلا يستخدم الشفاط (جهاز لسحب الغاز) في الحصول على تفريغ جزئي بدفع الماء بشدة خلال اختناق حيث يقل الضغط بدرجة كبيرة .

يمكننا أن نرى بسهولة من الشكل ٩ - ٢٦ أن الضغط عند A يجب أن يكون أكبر من الضغط عند B . فحيث أن كل حجم صغير من المائع يتسارع عندما يتحرك من A إلى B ، اذن لابد أن تؤثر عليه قوة غير متزنة متجهة إلى اليمين . وعليه فإن الضغط يجب أن يقل عند الانتقال من A إلى B . هل يمكنك أن تعكس هذا الخط في التفكير لإثبات أن الضغط عند C أكبر من الضغط عند B ؟



شكل (٩ - ٢٧)

تؤثر على جناح الطائرة قوة متجهة من منطقة السرعة المنخفضة (الضغط العالي) الموجودة تحت الجناح إلى منطقة السرعة العالية (الضغط المنخفض) الموجودة فوق الجناح .

تعطينا هذه النتيجة - وهي أن السرعة تكون كبيرة عندما يكون الضغط منخفضا . تفسيرا لتلك الحقائق المختلفة كرفع الهواء لجناح الطائرة عند إقلاعها والمسار المنحني لكرة يقذفها لاعب كرة ماهر . ويوضح الشكل ٩ - ٢٧ انسياب الهواء حول جناح طائرة . ستلاحظ في هذه الحالة أن الهواء يسير بسرعة أكبر على الجانب العلوي للجناح منه على الجانب الآخر . لهذا يكون الضغط على الجانب العلوي للجناح أقل مما يؤدي إلى دفع الجناح إلى أعلى .

٩ - ١٨ قياس ضغط الدم

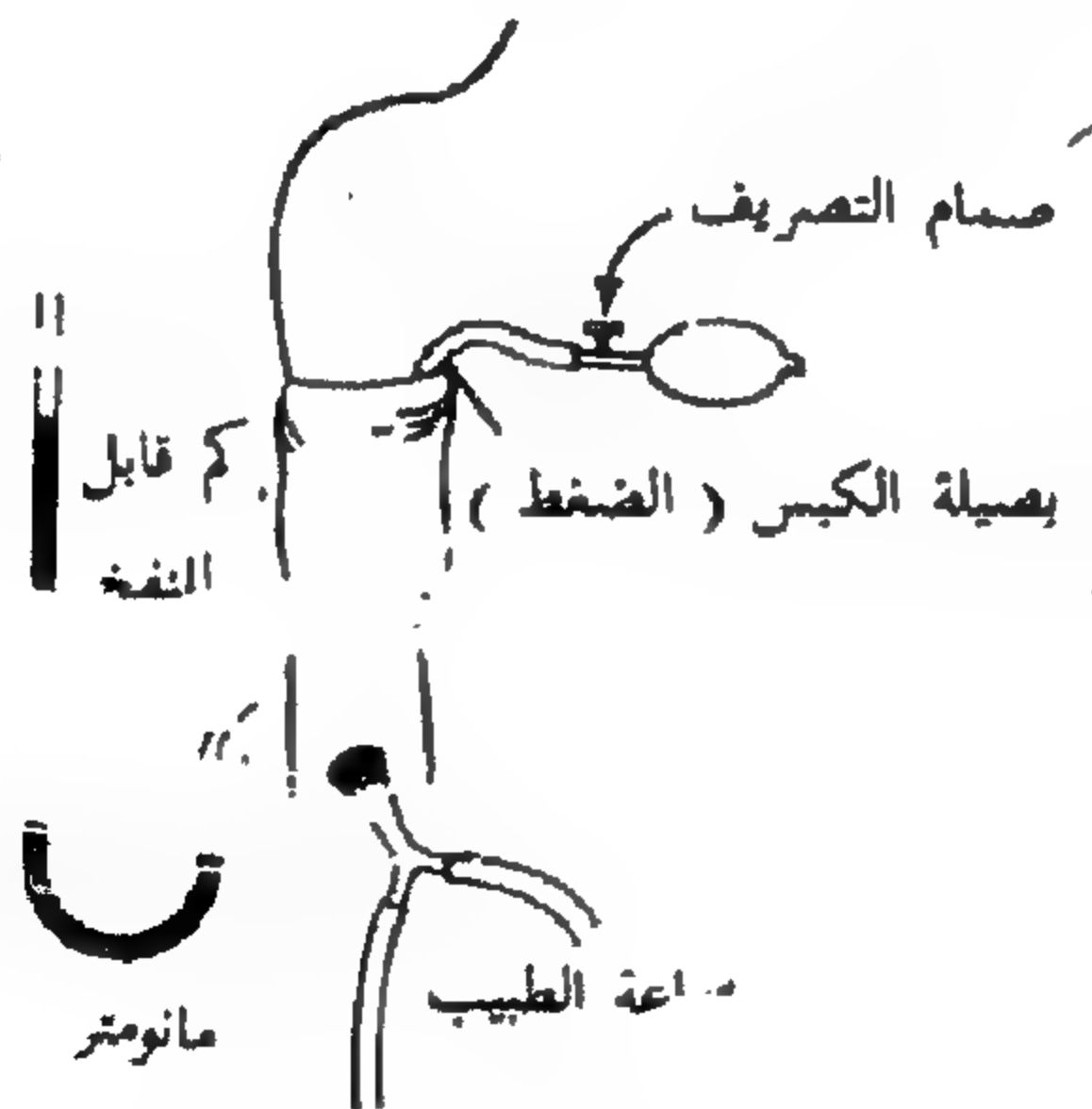
هناك أمثلة كثيرة أخرى لتوضيح أهمية انسياب الموائع . ولكن ماتبقى من هذا الفصل يكفي فقط لمثال واحد آخر وهو قياس ضغط الدم . من المعروف أن ضغط الدم في شرايينك وأوردتك يتغير تغيرا كبيرا كدالة في كل من الزمن والموضع في الجسم . فعندما ينبض القلب يرتفع ضغط الدم عند المخرج وينخفض على التعاقب ، وتنتشر هذه الاختلافات في الضغط في كل مكان في الجهاز الشرياني . ولكن عندما يتدفق الدم في الأوعية الصغيرة فالأصغر ، فإن ظواهر الاحتكاك ومزونة الأوعية ذاتها قد تؤدي إلى تغيير نمط السريان تماما . وفي النهاية ، عندما ينساب الدم في الأوردة في رحلة العودة إلى القلب يكون الانسياب منتظما تقريبا .

وتعتبر التغيرات الكبيرة في ضغط الدم في الشرايين ذات أهمية كبيرة في كثير من الوجوه . وبالرغم من ذلك فإننا سنذكر هنا وجهين فقط لذلك : (١) قد تؤدي النهايات العظمية العالية لضغط الدم إلى تمزق جدران الأوعية التي ينساب فيها الدم ، وتعتبر الضربات الشديدة التي تسبب ازرقاق لون الجلد مثلا لهذا التمزق . (٢) تعطى قسم وقيعان الضغط أثناء دورة نبض القلب معلومات عن اختناقات الأوعية الدموية وعن عوامل أخرى تؤثر على الدورة الدموية .

تعطى بيانات ضغط الدم العادية رقمين يمثل أحدهما الضغط الانقباضى للقلب ، ويمثل الآخر الضغط الانبساطى له . وهذان الرقمان هما قراءتا الضغط (بالمليمترات من الزئبق عادة) عند قمة ذروة انسياب الدم (الضغط الانقباضى) ونقطتها المنخفضة (الضغط الانبساطى) . وتستخدم رتيبة الموضحة فى الشكل ٩ - ٢٩ لقياس هاتين القيمتين .

يوضع لفافة أو كم قابل للنفخ حول العضد على نفس مستوى القلب ، ثم يراقب الضغط الذى يؤثر به الكم الملفوف على الذراع عند نفخها باستخدام مانومتر زئبقى . وعند دفع الهواء فى الكم حتى يزيد ضغطه عن ذروة الضغط فى شريان الذراع . يتوقف نتيجة لذلك سريان الدم فى أسفل الذراع . فإذا وضع شخص سماعة طبيب (مسماع) على الشريان قبل الكم فلن يسمع أى صوت لأن الدم لا ينساب فى الشريان .

يقلل الضغط بعد ذلك فى الكم تدريجياً بالسماح للهواء أن يتسرب منه . وفجأة يبدأ الشخص فى سماع نبض فى سماعة الطبيب عند ضغط معين يسمى الضغط الانقباضى . وعند هذه النقطة يكون الضغط فى الكم منخفضاً بدرجة تسمح للدم بالتدفق عبر الكم تحت قيمة الضغط . وتعطى قيمة ضغط الهواء فى الكم حيثئذ ضغط الدم عند ذروة ذروة نبض القلب ، وينشأ الصوت الذى يسمعه الشخص فى الحقيقة نتيجة للتدفق المضطرب للدم عبر اختناق الشريان تحت الكم .



شكل (٩ - ٢٨)
الجهاز المستخدم لقياس
ضغط الدم .

وعندما يقلل الضغط فى الكم أكثر من ذلك يصبح سريان الدم أقل اضطراباً وتلتقط سماعة الطبيب هذه الحقيقة كتغير فى حدة الصوت . وفى النهاية يتوقف الصوت تماماً . وعند هذا الضغط ، وهو الضغط الانبساطى ، يستطيع الدم أن ينساب عبر الكم فى كل أجزاء الدورة . إذن تمثل هذه القراءة أقل ضغط فى دورة النبض . والضغط الانقباضى والانبساطى فى الإنسان الشاب العادى هما حوالى

80 mm Hg, 120 mm Hg على الترتيب (ويكتبان عادة على الصورة 120/80) .
ولكن هذان الضغطان يتغيران عادة مع تقدم الانسان في السن . وبالرغم من ذلك
فإن الضغوط الانقباضية العالية جدا (200 mm Hg مثلا) تكون دائما تقريبا سببا
للقلق الشديد . أما التغيرات الأخرى في الضغط فإنها تحتاج عادة إلى بحث دقيق قبل
التعامل معها .

ملخص

تنقسم المواد إلى مجموعتين ، الموائع والجوامد . هناك نوعان من الموائع هما بالتحديد السوائل والغازات . يمكن تقسيم الجوامد إلى بلورية
وغير بلورية . هناك أمثلة للخطوط الفاصلة في جميع هذه التصنيفات . فالزجاج مثلا يمكن أن يصنف كجوامد أو سوائل لزجة جدا .
الكثافة الكتلية d لمادة هي كتلة وحدة الحجم من المادة : $d = m/V$. الكثافة الوزنية لمادة هي وزن وحدة الحجم : $D = W/V$.
زيادة درجة الحرارة تسبب نقص كثافة معظم المواد . ومع ذلك فإن الماء في مدى درجات الحرارة من 9°C إلى 4°C يعتبر استثناءً من هذه
القاعدة . يعرف الوزن النوعي بأنه النسبة بين كثافة المادة وكثافة الماء . تتغير هذه النسبة مع درجة الحرارة .
يتطابق قانون هوك على كثير من المواقف التي يكون فيها التشوه مرنا . ينص هذا القانون على أن التشوه يتناسب مع القوة المشوّهة . إذا
زاد التشوه عن حد المرونة لا يعود النظام ثانية إلى حالته قبل التشوه بعد إزالة القوة المشوّهة . يمكن صياغة قانون هوك بدلالة الإجهاد والانفعال
كالتالي : « الإجهاد يتناسب مع الانفعال » .

من التعريف ، معامل المرونة هو النسبة بين الإجهاد والانفعال . في حالة تشوه الشد يسمى المعامل معامل يونج . يستخدم معامل
القص في حالة التشوه القصي . عندما يحدث التشوه نتيجة لضغط متساو على جميع الأوجه ، تسمى النسبة بين الضغط والكمية $\Delta V/V$
معامل الحجم . مقلوب معامل الحجم يسمى الانضغاطية الحجمية .
زيادة الضغط نتيجة لسائل ارتفاعه h وكثافته الكتلية d يعطى بالعلاقة $\Delta P = h d g$ ، الضغط عند أى نقطة في مائع متساو في جميع
الاتجاهات . علاوة على ذلك ، إذا عرض سائل محبوس في وعاء ضغط فإن هذا الضغط ينتقل إلى كل نقطة في السائل . هذه القاعدة
تسمى قاعدة باسكال ، وهي أساس عمل المكبس الهيدرولي .

تنص قاعدة أرشميدس على أنه «إذا غمر جسم جزئيا أو كلياً في مائع فإنه يدفع إلى أعلى بقوة تساوي وزن السائل الذي يزيحه الجسم»
يمكن إيجاد حجم جسم ما باستخدام هذه القاعدة بوزن الجسم عندما يكون مغموراً في سائل معلوم الكثافة .

يمكن قياس ضغط الجو باستخدام البارومتر ، ويمكن قياس الفروق في الضغط باستخدام المانومتر . الضغط الجوي العياري هو
 $1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ وهو يساوي 14.7 lb/in^2 و 76 cm Hg .

في الانسياب الطبقي ينساب المائع على طول خطوط معينة تسمى الخطوط الانسيابية . عند حدوث التدفق المضطرب توجد مناطق لا تتبع
في المائع الخطوط الانسيابية .

اللزوجة مقياس للقوة اللازمة لحدوث انسياب من النوع القصي في السائل ويرمز لها بالرمز η ووحداتها في النظام SI هي النيوتن - ثانية
لكل متر مربع . وحدات اللزوجة في النظام cgs هي البواز (P) ، حيث $10P = 1 \text{ N.s/m}^2$. يعطى معدل التدفق لسائل لزج في أنبوبة
اسطوانية بقانون بوازيل . يمكن مقارنة لزوجة السوائل بقياس معدل التدفق في نفس الأنبوبة . عند اتخاذ الاحتياطات اللازمة يتناسب معدل
التدفق عكسياً مع اللزوجة .

تصف معادلة برنولي انسياب الموائع التي تكون تأثيرات اللزوجة فيها مهملة ويمكن استخدامها للحصول على نظرية توريشلي وشرح عمل
الشفطات والمراديز والأجهزة المشابهة .

للحصول على ضغط الدم يجب قياس قيمتين له . أعلى ضغط في دورة نبض القلب هو الضغط الانقباضى ، وأقل ضغط هو الضغط الانبساطى . الضغط الانقباضى والضغط الانبساطى العاديان للإنسان الشاب هما 120 mm Hg ، 80 mm Hg على الترتيب .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

- ١ - وضع كل مادة من مجموعة المواد المعروفة في الصنف (أو الأصناف) المناسبة : غاز ، سائل ، جامد ، مائع ، جامد بلورى ، جامد غير متبلور ، زجاج . ذكر خصائص كل صنف .
- ٢ - تعريف الكثافة الوزنية والكثافة الكتلية . حساب كل منهما لمادة عند معرفة البيانات اللازمة . استخدام الكثافة لحساب حجم كتلة معينة أو وزن معين من المادة . ذكر العلاقة بين d و D .
- ٣ - رسم شكل تخطيطى للعلاقة البيانية بين الاستطالة والقوة لمادة تتبع قانون هوك . ذكر معنى (تعريف) الإجهاد والانفعال في حالة تشوه الشد والتشوه القصي والتشوه الحجمي . تعريف المعامل في كل حالة . كتابة قانون هوك بدلالة الإجهاد والانفعال .
- ٤ - كتابة العلاقة بين الانضغاطية الحجمية ومعامل الحجم وذكر الوحدات المناسبة لكل منها .
- ٥ - شرح لماذا تنهار العلبة المبينة في الشكل ٩ - ١٠ عندما تفرغها المضخة من الهواء .
- ٦ - إيجاد ضغط عمود من مائع معلوم الكثافة . شرح كيفية استخدام مانومتر لقياس فروق الضغط . شرح مبدأ عمل البارومتر الزئبقى . إيجاد القوة الناتجة من مائع على مساحة معينة تقع على عمق معلوم فيه .
- ٧ - ذكر نظرية باسكال وشرح كيفية استخدامها في الكبس الهيدرولى .
- ٨ - ذكر قاعدة أرشميدس واستخدامها لإيجاد قوة الطفو التى تؤثر على جسم معلوم الحجم مغمور في مائع معلوم الكثافة .
- ٩ - استخدام قاعدة أرشميدس لحساب كثافة مادة بتعيين حجمها عن طريق غمرها في مائع معلوم الكثافة .
- ١٠ - كتابة قيمة الضغط الجوى العيارى بالنيوتن لكل متر مربع والباوند لكل بوصة مربعة والسنتيمترات من الزئبق .
- ١١ - شرح معنى الانسياب الطبقي والخطوط الانسيابية والدفق المضطرب .
- ١٢ - ترتيب مجموعة من المواد ترتيبا تصاعديا بالنسبة للزوجتها . شرح معنى اللزوجة وكيف ترتبط بفواقد الطاقة الاحتكاكية . ذكر الوحدات الشائعة التى تقاس بها اللزوجة .
- ١٣ - تعريف كل كمية في قانون بوازىل واستخدامه في الحسابات البسيطة .
- ١٤ - تعريف كل كمية في معادلة برنولى واستخدامها في الحسابات البسيطة . اشتقاق نظرية ترويشلى منه . واستخدام برنولى لإثبات أن الضغط يقل مع زيادة معدل الدفع .
- ١٥ - شرح مايفعله الطبيب أو الطبيبة عند قياس ضغط الدم .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

الغازات ، السوائل ، الجوامد
الموائع

الجامد المتبلور مقابل الجامد غير المتبلور

الكثافتين الوزنية والحجمية

قانون هوك

الجسم المرن ، حد المرونة

الإجهاد والانفعال والمعامل
معامل الشد ومعامل القص ومعامل الحجم
المطابقة ، الانضغاطية الحجمية
 $\Delta P = h \rho g$

قاعدة ارشميدس ، القوة المصومة
البارومتر والمانومتر
الضغط الجوي العياري
الخطوط الانسيابية ، الانسياب الطبقي
الدفق المضطرب
اللزوجة ، وحدة البوينز
قانون بوازيل
معادلة برنولي
السرعة العالية تدل ضمنا على الضغط المنخفض
الضغط الانقباضي والضغط الانبساطي

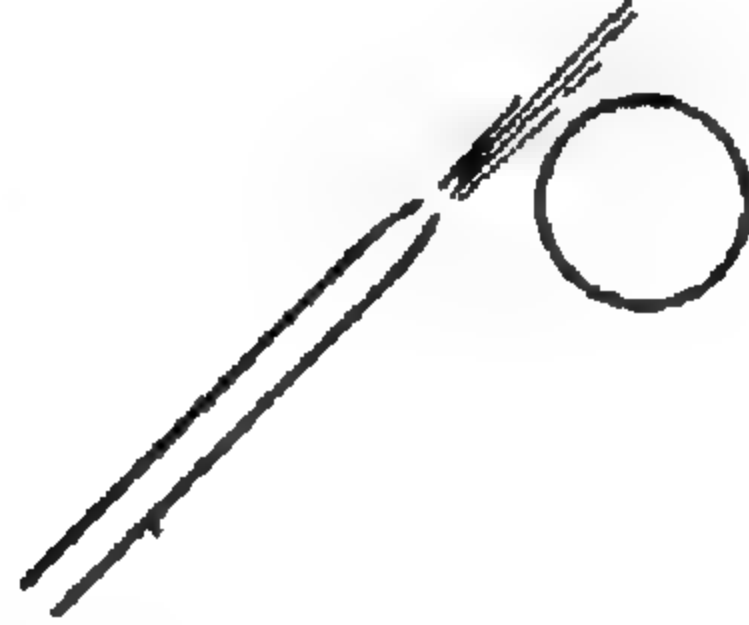
اسئلة وتخمينات

- ١ - افترض أن لديك مكعبا مصنعا من المعدن . كيف يمكنك تعيين كثافته ؟
- ٢ - كيف يمكنك تعيين كثافة الزجاج المصنوع منه كرات زجاجية صغيرة ؟ افترض أن الكرات اصغر من أن توزن أو تقاس باستخدام الأجهزة المتاحة . افترض مع ذلك أن لديك كمية وفيرة من المادة .
- ٣ - كيف يمكنك أن تعين كثافة سائل وكثافة غاز ؟
- ٤ - قارن الضغط على عمق 5.0 m في بحيرة صغيرة بالضغط على عمق 5.0 m تحت سطح بحيرة كبيرة . كيف تعتمد القوة التي يجب أن يتحملها سد على عمق البحيرة المقام عليها هذا السد ؟
- ٥ - اشرح لماذا « يبحث الماء عن مستواه الخاص » ؟
- ٦ - كيف يمكنك قياس معامل القص لقطعة من الحلوى الجيلاتينية ؟ لماذا يجب ان يعتمد المعامل على ما إذا كان الجيلاتين يحوى على قطع من الفاكهة أم لا ؟ تحوى اللدائن المقواة كالزجاج الليفى على ألياف زجاجية بداخل اللدن . ماهو تأثير الألياف الزجاجية على الخواص الميكانيكية لللدائن ؟ (العظم مقوى بألياف الكولا جين بنفس الطريقة ، لهذا فإن معامل الشد ومقاومة الشد للعظم أكبر مما لو كانت هذه الألياف غير موجودة) .
- ٧ - تقل لزوجة جميع السوائل تقريبا مع درجة الحرارة . وكما سنرى في الفصل التالى تزداد طاقة حركة الجزيئات في السائل مع زيادة درجة الحرارة . كيف يمكن استخدام هذه الحقيقة في تبهر تغير اللزوجة مع درجة الحرارة ؟
- ٨ - تتكون بلازما الدم من الدم الذى أزيلت منه الصفائح الدموية والمواد ، الدموية الأخرى . ولزوجة الدم ككل هي 4 cP تقريبا ، بينما لزوجة بلازما الدم هي حوالى 1.5 cP . اشرح سبب هذا الاختلاف ؟
- ٩ - وضعت كأس زجاجية مملوءة إلى حافتها بالماء على ميزان ، ثم وضع قالب من الخشب يرفق لى الماء بحيث طفا لى الكأس ، عندئذ طفع بعض الماء ونشف بقطعة من القماش وفى النهاية ظلت الكأس مملوءة إلى حافتها . قارن قراءتى الميزان الابتدائية والنهائية .
- ١٠ - اشرح كيف يمكنك تعيين كثافة جسم غير منتظم الشكل باستخدام قاعدة ارشميدس : أولا : إذا كانت مادة الجسم أكبر كثافة من السائل المستخدم ، ثانيا : إذا كانت مادة الجسم أقل كثافة من السائل المستخدم .
- ١١ - قدر كثافة جسمك بالاستعانة بخبرتك الخاصة فى الطفو . (ق)

- ١٢ - اشرح مبدأ عمل السيرون .
- ١٣ - لكي تسير كرة البيسبول في مسار منحني يضع اللاعب « تدويما » عليها . اشرح لماذا يجب أن تتبع الكرة المدونة مسار منحني .
- ١٤ - يمكن أن تتعلق كرة البنج بونج في الهواء بنفخ تيار مندفع من الهواء فوقها مباشرة كما هو موضح في الشكل م ٩ - ١ . اشرح .
- ١٥ - ناقش معنى معادلة برنولي عندما لا يكون السائل مناسباً .

مسائل

- ١ - كرة من الصلب نصف قطرها 0.50 cm وكتلتها 4.15 g . اوجد الكثافة الكتلية للصلب .
- ٢ - علبة وزنها 3.1 lb عندما تكون فارغة ووزنها 46.2 lb عندما تكون مملوءة بالماء . ماهو حجم العلبة ؟



شكل (م ٩ - ١)

- ٣ - كثافة الجسم البشري قريبة من كثافة الماء . اوجد الحجم الذي يشغله شخص كتلته 70 kg .
- ٤ - البكنومتر هو قارورة صغيرة تستخدم لتحديد كثافة السوائل . في حالة معينة كان « وزن » البكنومتر فارغاً 20.00 g وكان « وزنه » مملوءاً بالماء 22.00 g عند 20°C . أفرغ البكنومتر وجفف ثم أعيد ملئه بمحلول بنزني فكان « وزنه » 21.76 g . باستخدام هذه القياسات ومعلومية كثافة الماء اوجد حجم القارورة وكثافة المحلول البنزني . في جميع القياسات الدقيقة للكثافة يجب أن يؤخذ وزن الهواء الموجود في القارورة الفارغة في الاعتبار . ماهو « وزن » الهواء في البكنومتر الموصوف في هذه المسألة (كثافة الهواء تساوي 0.00129 g/cm³) .
- ٥ - علق جسم كتلته 5.0 kg في طرف سلك من الصلب قطره 0.70 mm وطوله 1.4 m . اما مقدار استطالة السلك تحت تأثير هذا الحمل ؟
- ٦ - مسك طوق مقطوع من المطاط من أحد طرفيه وعلق حمل صغير في الطرف الآخر لكي يظل الطوق مشدوداً . وكان طول الطوق 9.0 in ومساحة مقطعه $7.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. وعندما أضيف حمل قدره 2.0 lb إلى طرفه استطال الطوق المطاطي بمقدار 0.27 in . اوجد متوسط معامل بونج في هذا المدى بالباوند لكل بوصة مربعة .
- ٧ - إشارة مرور ضوئية كتلتها 80 lb معلقة فوق منتصف طريق بواسطة حبلين من الصلب متساويين في الطول موهطين في قائمين على جانبي الطريق . فإذا كان كل من الحبلين يصنع زاوية قدرها 20° مع الأفقي ، فما هي الاستطالة النسبية للحبلين تحت تأثير وزن الإشارة الضوئية ؟ افترض ان مساحة مقطع كل من الحبلين 0.03 in² .
- ٨ - استخدم حبل من النحاس مساحة مقطعه 0.0030 cm² في رفع جسم كتلته 100 g . بأي تسارع يجب أن يرفع الجسم إذا كانت استطالة السلك لا يجب أن تزيد عن 0.10% ؟

- ٩ - اثبت أن الزيادة الجزئية في طول سلك يتكون من طول قدره L_1 من السلك 1 متصل بطول قدره L_2 من السلك 2 تحت تأثير حمل تعطى بالكمية :

$$\left(\frac{F}{\pi a^2 Y_1 Y_2} \right) \left(\frac{L_1 Y_2 + L_2 Y_1}{L_1 + L_2} \right)$$

علماً بأن السلكين لهما نفس نصف القطر a .

- ١٠ - قالب من الجيلاتين بعدا سطحه العلوي 4.0 cm × 4.0 cm وارتفاعه 3.0 cm . طبقت على سطحه العلوي قوة قصية مقدارها 0.50 N فتسببت في إزاحته مسافة قدرها 2.5 mm في اتجاه القوة . اوجد معامل النقص للجيلاتين بالنسبة لكل متر مربع .

١١ - (أ) بأى نسبة بالتقريب سوف يتغير حجم قضيب من الصلب إذا وضع القضيب في غرفة تفريغ ثم فرغت الغرفة من الهواء ؟ (ب) ماقيمة الزيادة في الضغط اللازمة لكي يقل حجم من البنزين بمقدار 1% ؟

١٢ - ماهو متوسط الضغط الذى تؤثر به الأرضية على قدم سيدة كتلتها 70 kg عندما تقف على رؤوس أصابع قدم واحدة ؟ افترض ان مساحة التلامس بين القدم والأرضية هي 12 cm^2 .

١٣ - الضغط الجوى العيارى هو $1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ اوجد القوة التى يؤثر بها الجو على جانب علبة مساحتها 600 cm^2 . عبر عن إجابتك بالنيوتن والباوند .

١٤ - ماهو ضغط الماء على عمق 15.0 m في بحيرة عذبة ؟ ماهو الضغط الكلى عند ذلك البعد بفرض أن الضغط الجوى هو $1.00 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ؟

١٥ - الضغط الجوى العيارى هو $1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (14.7 lb/in^2) ماهو طول عمود الماء الذى يستطيع هذا الضغط أن يحمله ؟ (ب) ماهو أقصى ارتفاع يمكن عنده رفع الماء من بئر باستخدام مضخة ماء من النوع التفريغى إذا كان ضغط الجو هو الضغط الجوى العيارى ؟

١٦ - شفت شخص فتحة أحد فرعى مانومتر زئبقى فاستطاع أن يجعل سطح الزئبق فيه مرتفع عن سطح الزئبق في الفرع الآخر بمقدار 74 mm (لا يوصى بإجراء ذلك لأن بخار الزئبق سام) . ماهو ضغط الهواء في فم هذا الشخص عند إجراء هذه التجربة إذا كان الضغط الجوى هو $1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ؟ عبر عن إجابتك بالسنتيمترات من الزئبق والنيوتن لكل متر مربع .

١٧ - أنبوبة على شكل الحرف U (تشبه المانومتر المبين في شكل ٩ - ١٩ إلى درجة كبيرة) تحتوى على الماء في أحد فرعيها والزيت في الفرع الآخر . وقد وجد أن عمودا من الزيت ارتفاعه 62 cm في أحد الفرعين يتزن مع عمود من الماء ارتفاعه 54 cm في الفرع الآخر . ماهى كثافة الزيت ؟

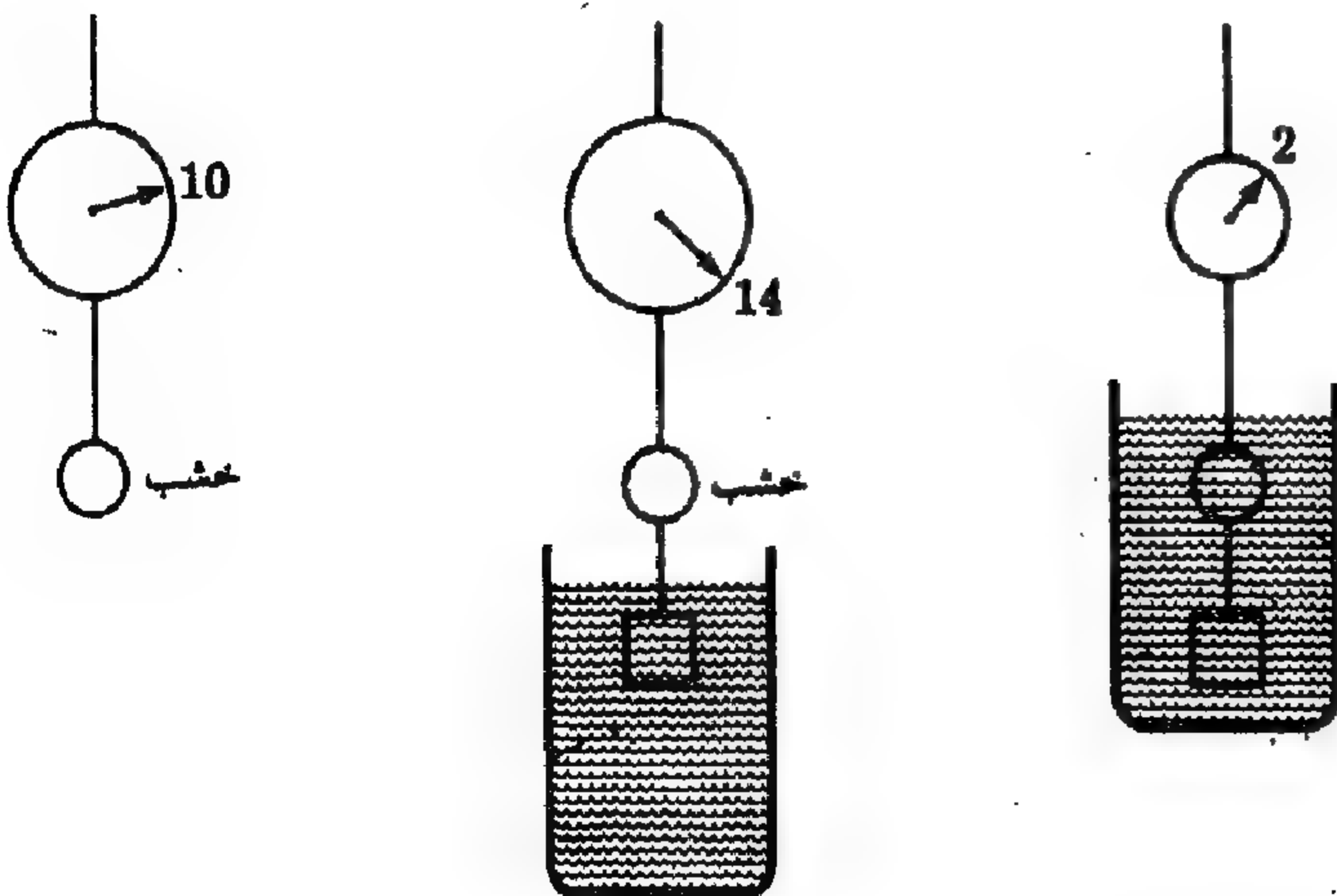
١٨ - تؤثر مكينة التشغيل بالكبس على اللوح المعدنى بقوة هائلة لتحواله إلى الشكل المطلوب . افترض أن ضغط الدخلى هو 150 lb/in^2 وأنه يطبق على كباس قطره 0.5 in . وتؤثر قوة خرج المكبس الهيدرولى على كباس قطره 1.3 ft . ماهى القوة التى يؤثر بها المكبس على اللوح المراد تشكيله ؟

١٩ - يطفو رجل على الماء بحيث يكون 95% من حجمه تحت سطح الماء . ماهى الكثافة الكتلية له ؟

٢٠ - تزن قطعة من المعدن غير منتظمة الشكل 10.00 g في الهواء و 8.00 g عندما تكون مغمورة في الماء . اوجد حجم المعدن وكثافته .

٢١ - « تزن » القطعة المعدنية المذكورة في المسألة السابقة 8.50 g عندما تكون مغمورة في زيت معين . اوجد كثافة الزيت .

٢٢ - « تزن » قطعة من الخشب 10.00 g في الهواء . وعندما علقت قطعة ثقيلة من المعدن أسفلها ، وكان المعدن مغمورا في الماء ، وجد أن «وزن» الخشب في الهواء بالإضافة إلى وزن المعدن في الماء هو 14.00 g . ثم غمر الخشب والمعدن سويا في الماء فوجد أن «وزنهما» الإجمالى في الماء هو 2.00 g . اوجد حجم وكثافة الخشب (أنظر الشكل م ٩ - ٢) .



شكل (م ٩ - ٢)

- ٢٣ - «ترن» كأس مملوءة جزئيا بالماء 20.00 g . فإذا وضعت قطعة من الخشب كثافتها 0.800 g/cm^3 وحجمها 2.0 cm^3 طافية على سطح الماء في الكأس ، فما هو « وزن » الكأس في هذه الحالة ؟
- ٢٤ - «ترن» كأس مملوءة جزئيا بالماء 20.00 g . علقت قطعة من المعدن كثافتها 3.00 g/cm^3 وحجمها 1.5 cm^3 في خيط رفيع وغمرت في الماء بحيث لا تستقر على قاع الكأس ، ماهو «وزن» الكأس في هذه الحالة ؟
- ٢٥ - كثافة الثلج 0.917 g/cm^3 والكثافة التقريبية لماء البحر الذي يطفو فيه الثلج 1.025 g/cm^3 . ماهي النسبة بين حجم الجزء المغمور من جبل الثلج تحت سطح الماء وحجمه الكلي ؟
- ٢٦ - ماهو أصغر حجم لقالب من المادة ($D = 50 \text{ lb/ft}^3$) يمكن أن تحمل رجلا وزنه 160 lb كلية فوق سطح الماء عندما يقف عليه .
- ٢٧ - قالب من مادة كثافتها d_1 يطفو على سائل مجهول الكثافة بحيث يغمر ثلاثة أرباع حجمه فيه . اثبت أن كثافة السائل المجهول هي $d_2 = 1.33 d_1$.
- ٢٨ - طبقا للنظرية التي استنبطها ستوكس لأول مرة تعطى القوة اللازمة لجذب كرة نصف قطرها d بسرعة قدرها v في مائع لزوجته η بالمعادلة التالية (المعروفة بقانون ستوكس) :

$$F = 6\pi\eta av$$

ماقيمة القوة اللازمة لجذب بلية نصف قطرها 1.50 cm في الماء بسرعة قدرها 20 cm/s ؟

- ٢٩ - أسقطت كرة زجاجية صغيرة نصف قطرها 0.50 mm وكثافة مادتها 2600 kg/m^3 في حوض زيت ($d = 950 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 2.1 \text{ P}$) اوجد (أ) قوة الطفو المؤثرة على الكرة ، (ب) قوة الجذب المؤثرة على الكرة . (ج) ثم استخدم قانون ستوكس (انظر المسألة ٢٨) لإيجاد السرعة النهائية للكرة عند سقوطها في الزيت .
- ٣٠ - يعين حجم الجسيمات الكروية الدقيقة عادة بقياس سرعة ترسيبها . اثبت أنه إذا كان جسيم كثافته d يصل إلى سرعة نهائية قدرها v عند السقوط في مائع كثافته d_1 ولزوجته η فإن نصف قطره يعطى b بالعلاقة :

$$b = \sqrt{\frac{9\eta v}{2g(d - d_1)}}$$

استخدم قانون ستوكس (انظر المسألة ٢٨) .

- ٣١ - ينسرب الماء من ماسورة قريبة من قاع خزان ضخيم لتخزين الماء على هيئة تيار من الماء مندفع منها . فإذا كان سطح الماء في الخزان يقع على ارتفاع 50 ft من نقطة التسرب ، (أ) بأي سرعة يندفع الماء من الفتحة ؟ (ب) إذا كانت مساحة الفتحة 0.010 in^2 فما هي كمية الماء المتدفقة منه في 1s ؟
- ٣٢ - ينساب الماء بهدوء في داخل نظام مغلق من المواسير . وكانت سرعة الماء في إحدى النقاط 3.0 ft/s ، بينما كانت سرعته 4.0 ft/s في نقطة أخرى تقع على ارتفاع 10 ft من النقطة الأولى . فإذا كان الضغط عند النقطة 12 lb/in^2 ، (أ) ماقيمة الضغط عند النقطة العليا ؟ (ب) ماهو الضغط عند النقطة العليا إذا كان الماء يتوقف عن الجريان عندما يكون الضغط عند النقطة السفلى 10 lb/in^2 ؟
- ٣٣ - إبرة تحت جلدية (للحقن تحت الجلد) نصف قطرها 0.40 mm وطولها 5.0 cm مركبة في محقن مساحة سطح مكبسه 3.0 cm^2 ماهي القوة التي يجب أن تؤثر على المكبس بحيث يتدفق الماء من الإبرة بمعدل قدره $0.20 \text{ cm}^3/\text{s}$ ؟ افترض أن الإبرة تدفع الماء في الهواء .
- ٣٤ - يعين الحد الفاصل بين الانسياب الطبقي والدفق المضطرب باستخدام عدد يسمى عدد رينولدز ، ويعطى هذا العدد بالعلاقة :

$$\text{عدد رينولدز} = \frac{Qd}{\pi r \eta}$$

حيث Q معدل دفع مائع كثافته d ولزوجته η في أنبوبة أسطوانية نصف قطرها r . ويبدأ ظهور الدفق المضطرب إذا زاد عدد رينولدز عن حوالي 1000 . إوجد بالتقريب أقصى معدل للدفق في حالة الانسياب الطبقي للبتزين في أنبوبة قطرها 0.50 cm . عبر عن إجابتك بالسنتيمترات المكعبة في الثانية وافترض أن القيمة الحرجة لعدد رينولدز هي 1000 .

الفصل العاشر

درجة الحرارة والحركة وقانون الغاز

نبدأ بهذا الفصل دراسة الطاقة الحرارية وتأثيراتها . وسنقدم تعريف درجة الحرارة ونناقش طبيعة الحرارة . وبعد تناول قانون الغاز سيكون في مقدورنا أن نستنتج أن درجة الحرارة تكون مقياساً لطاقة حركة الجزيئات وأن الطاقة الحرارية هي طاقة الحركة الجزيئية العشوائية للغاز . وسنحتاج لهذه المفاهيم كأساس للفصل التالي المخصص لدراسة الخواص الحرارية للمواد وتكافؤ الحرارة والصور الأخرى للطاقة .

١٠ - ١ الآراء السابقة عن كنه الحرارة

ظلت طبيعة الحرارة مصدر اهتمام الإنسان منذ أن اكتشف النار في قديم الزمن . ونحن نعلم الآن أن الخواص العجيبة للنار قد جعلت الإنسان القديم يؤهلها . وبالرغم من أن التضج الروحي للجزء الأعظم من الجنس البشرى قد وصل إلى مستوى لم تعد معه النار تعتبر إلهها ، إلا أن الشعور بأن الحرارة والنار صفات ذات معنى روحي غير يادية للحواس أو مدركة بالعقل قد استمر إلى وقت قريب نسبيا .

وفي القرن الثامن عشر كان الناس يعتقدون أن الحرارة التي تدفئ أجسامهم عند وقوفهم بالقرب من النار هي كمية مادية تنساب إليهم في الفراغ . وقد سمي هذا المائع **كالوريك** . وعند تبريد قطعة من المعدن الساخن بالماء كان يعتقد أن السيل الحرارى - كالوريك - ينساب من المعدن إلى الماء . وعندما ينتزع اللهب قطعة من الخشب المشتعلة يتحرر السيل الحرارى - كالوريك - وينساب إلى الأجسام الأخرى ، أو هكذا كان الناس يظنون في الثمانينات من القرن الثامن عشر . وكل قطعة من المادة - حسب الاعتقاد السائد في ذلك الوقت - تحتوى على كمية أكبر أو أقل من الحرارة حسب حرارتها .

ولم يواجه مفهوم السيل الحرارى السائد أى تحد مؤثر إلا في التسعينات من القرن الثامن عشر . وكان بنيامين طومسون (الذى منح لقب كونت رمفورد) هو الذى سدد الضربة القاضية لنظرية الكالوريك . كان رمفورد أمريكيا التحق بالقوات البريطانية أثناء الثورة الأمريكية ، وأصبح خبيرا للأسلحة وخدم كموظف رسمى فى حكومة بافاريا لسنوات طويلة . وفى ذلك الوقت قام رمفورد بإجراء عدد من التجارب العلمية فى ورشة للمدافع فى دار صناعة الأسلحة الحربية بميونخ .

لاحظ رمفورد تولد كمية كبيرة من الحرارة أثناء ثقب مواسير المدافع . وحيث أن الشظايا المعدنية المقطوعة بالمشقاب قد فقدت الكالوريك ، أى الحرارة المنطلقة فى عملية الثقب ، فإن الشظايا يجب أن تختلف عن المعدن الأصيل الذى لم يفقد الكالوريك . وبالرغم من ذلك فإن رمفورد لم يستطع إيجاد أى فرق بين الشظايا والمعدن الأصيل فى قدرتها على الاحتفاظ بالحرارة أو إطلاقها . وفى محاولة لدراسة هذه الظاهرة ببغض التفصيل جرب رمفورد مشقبا قليلا (غير حاد الطرف) جدا لا يستطيع قطع المعدن . وبالرغم من عدم قطع أى جزء من المعدن وجد أن المشقاب يولد الحرارة أيضا أثناء دورانه وحكه فى المعدن . وفى الحقيقة كان المشقاب يولد كمية من الحرارة كافية لغليان كمية من الماء موجودة فى تجويف بالمعدن . ومهما تكرر استخدام المشقاب بالطريقة السابق وصفها فإن الحرارة كانت تتولد بسهولة فى كل مرة يعاد استخدام المشقاب فيها من جديد . من هذا استنتج رمفورد أن مصدر الحرارة لاينفذ .

وبالإضافة إلى ذلك استنتج أن الحرارة لا تأتي من المعدن ، ولكن من دوران المثقاب . نتيجة لذلك نبذ رمفورد مفهوم الكالوريك تماما في عام ١٧٩٨ . وبدلاً من ذلك افترض أن حركة المثقاب تنقل الحركة إلى جزيئات المعدن وأن الحرارة هي هذه الحركة بالفعل . وطالما استمر المثقاب في نقل الحركة إلى المعدن بواسطة قوى الاحتكاك فإن الحركة والحرارة تستمر في الزيادة في داخل المعدن . وهذه هي أساسا الصورة التي يقبلها العلماء اليوم عن الحرارة . وسوف نعود إلى مناقشة طبيعة الحرارة مرة أخرى بعد أن نتعرف على مفهوم درجة الحرارة أولاً .

١٠ - ٢ الترمومترات

وجدت الوسائل العلمية لقياس مدى سخونة الأجسام قبل اكتشاف رمفورد بزمان طويل . ونحن نعلم كيفيا ماذا يعنى بكلمة ساخن أو بارد . ونعلم أيضا أنه إذا وضع جسم ساخن ملامسا لجسم بارد فإن الجسم الساخن سوف يبرد بينما يسخن الجسم البارد . ولقياس سخونة جسم ما يجب إيجاد طريقة للتعبير عن هذه الخاصية للجسم برقم معين ، وسوف نسمى هذا الرقم درجة حرارة الجسم . وهناك طرق كثيرة لربط خاصية السخونة برقم معين ، ولكن أربعة منها فقط قد لاقت قبولا واسعا .



شكل (١٠ - ١)

عند تسخين الزئبق الموجود في البصيلة الزجاجية فإنه يتمدد ويرتفع في الأنبوبة الشعرية . ويعتبر الارتفاع الذي يصل إليه الزئبق في الأنبوبة الشعرية مقياسا لدرجة الحرارة .

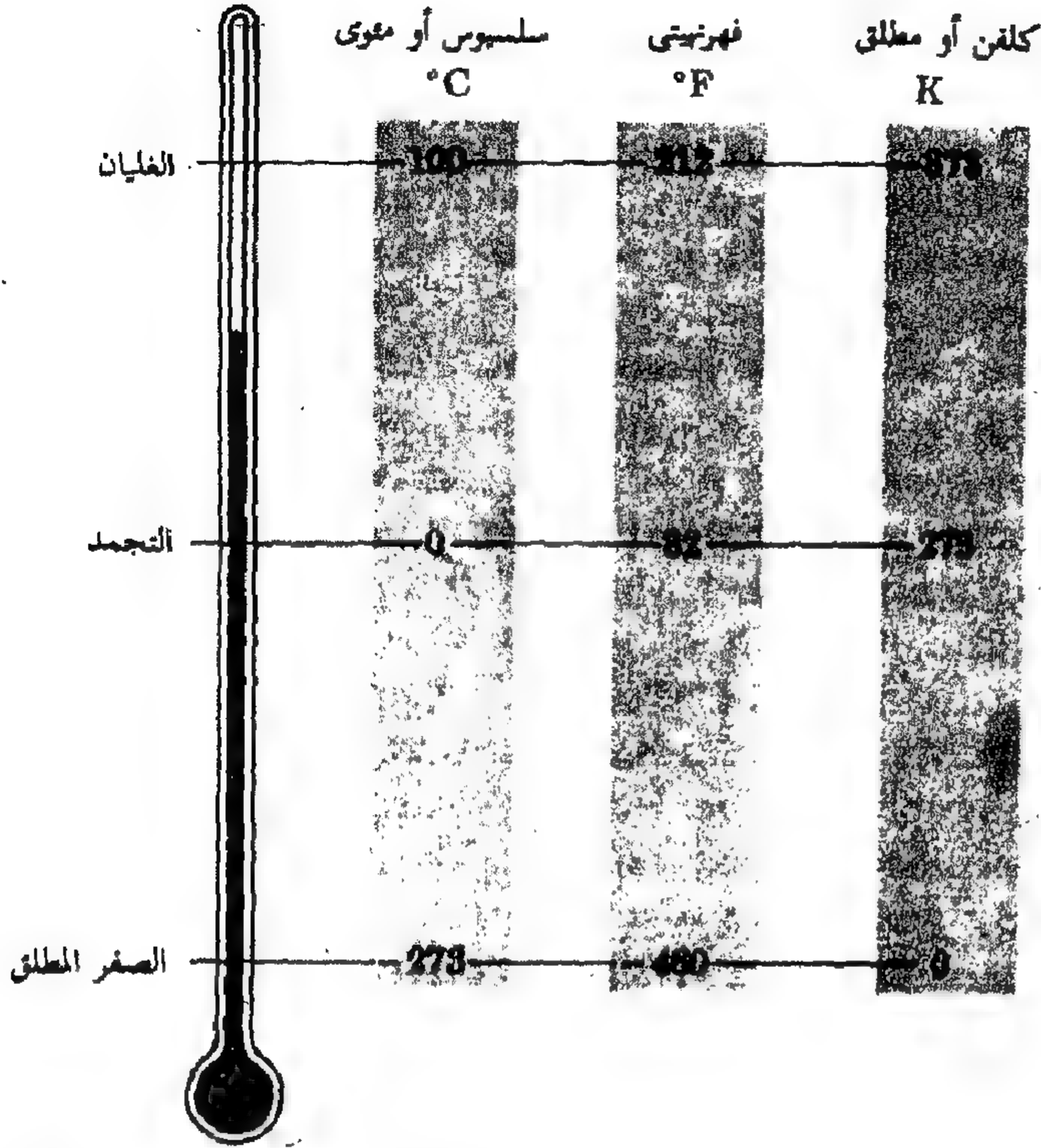
تبنى جميع الترمومترات تقريبا على أساس أن معظم السوائل والجوامد تتمدد عند تسخينها ، وهو ماسوف تناقشه باستفاضة مؤخرا في هذا الفصل . إذا ملئت بصيلة بسائل كالزئبق ووصلت بأنبوبة شعرية منتظمة كما هو مبين في الشكل ١٠ - ١ ، فإن هذا الجهاز يمكن استخدامه كترموتر . فإذا سخن الجهاز فإن الزئبق يتمدد ويرتفع في الأنبوبة الشعرية . ومن ثم فإن ارتفاع الزئبق يكون مقياساً لسخونة ، أو درجة حرارة الجهاز .

ولكى نضع قيمة عددية على كل مستوى للسخونة يجب أن نعرف مقياسا لدرجات الحرارة ، وهذا ما تم إنجازه بالفعل بطرق مختلفة في خلال أعوام كثيرة . فمثلا ، يمكن التعبير عن مقياس درجات الحرارة بطريقة مناسبة بدلالة نقطتي غليان وتجمد الماء النقي* .

فإذا وضع الجهاز المبين في الشكل ١٠ - ١ في وعاء يحتوي على الماء والثلج المنصهر فإن الزئبق سوف يصل إلى مستوى معين في الأنبوبة الشعرية . عندئذ نوضع علامة عند ذلك المستوى . يوضع الجهاز الآن في ماء يغلي (عند ضغط جوى قدره 760 mmHg) وتوضع علامة أخرى على الأنبوبة الشعرية عند هذا المستوى الجديد

* ظل مقياس درجات الحرارة المقبول عالميا معرّفا بدلالة هاتين النقطتين المرجعيتين حتى عام ١٩٥٤ . وسوف تناقش المقياس العمارى لدرجات الحرارة الذى تم تنبيهه في هذا العام بعد مناقشة قانون الغاز . انظر الجزء ١٠ - ٧ .

الأعلى للزئبق . هناك ثلاث طرق شائعة لوضع الأرقام على طول الأنبوبة الشعرية لقراءة درجة الحرارة وهي تعطى ثلاثة تدريجات مختلفة لدرجات الحرارة . وهذا موضح في الشكل ١٠ - ٢ الذى يبين علامتى التدرج السابق تعيينهما وكذلك المقاييس الثلاثة المختلفة التى يمكن تركيبها عليهما .



شكل (١٠ - ٢)
يمكن استخدام نقطتى غليان وتجمد الماء لتوضيح العلاقة المتبادلة بين مقاييس درجات الحرارة العادية الثلاثة .

يجب أن نلاحظ أن مقياس سلسيوس (الذى كان يسمى المقياس المئوى فيما سبق) ومقياس كلفن لدرجات الحرارة يقسمان المنطقة من نقطة غليان الماء إلى نقطة تجمده إلى 100 جزء تسمى الدرجات ، بينما يقسم مقياس فهرنهايت هذه المنطقة إلى 180 درجة . إذن درجة سلسيوس (أى الدرجة المئوية) أكبر من درجة فهرنهايت بمقدار $\frac{180}{100}$ أو $\frac{9}{5}$.

يستخدم مقياس سلسيوس لدرجات الحرارة فى جميع أنحاء العالم . وسوف تنتقل الولايات المتحدة رسمياً إلى هذا المقياس عندما تتحول إلى النظام المترى . وبالرغم من أن مقياس فهرنهايت كان يستخدم فى وقت ما على نطاق واسع فى جميع الدول المتحدثة بالانجليزية فإن من النادر استخدامه الآن خارج الولايات المتحدة . ويستخدم مقياس كلفن درجات حرارة تساوى درجات الحرارة فى مقياس سلسيوس ، ولكن نقطة الصفر فيه مختلفة ، ومقياس كلفن هو المقياس الذى يستخدمه العلماء عادة .

ويجب أن نوضح هنا أن الترمومتر الزئبقي المذكور آنفا لا يعمل تحت درجة 39°C - لأن الزئبق يتجمد عند هذه الدرجة ، ومن الممكن التغلب على هذه الصعوبة باستخدام الكحول أو البنتان أو أى سائل آخر درجة تجمده منخفضة لقياس درجات الحرارة المنخفضة . بالإضافة إلى ذلك فإن أى سائلين لا يتمددان بنفس الطريقة تماما في كل مدى درجات الحرارة . من هذا تتضح الحاجة إلى طريقة قياسية أكثر دقة لتقسيم مقاييس درجات الحرارة ، وتبنى هذه الطريقة على ترمومتر يستخدم الغاز بدلا من السائل .

وبالرغم من أن الترمومترات التي كنا نناقشها هي أكثر الترمومترات شيوعا إلا أن هناك أنواع أخرى من الترمومترات . ومن ناحية المبدأ يمكن استخدام أى كمية فيزيائية تتغير بطريقة متكررة مع درجة الحرارة كجهاز لقياس درجات الحرارة .

وتحدد الاعتبارات العملية نوع الجهاز الذي يجب أن يستخدم في ظروف معينة ، وربما كان الترمستور واحدا من أكثر هذه الأجهزة نفعا . ذلك لأن المقاومة الكهربائية للترمستور تتغير مع درجة الحرارة ، ويمكن تحويل هذا التغير في المقاومة كهربائيا إلى قراءة لدرجة الحرارة على مقياس مترى . والترمستور نفسه قد يكون صغيرا جدا ويمكن توصيله إلى جهاز القراءة بواسطة أسلاك دقيقة . وحيث أن زمن استجابته في حدود ثانية واحدة فإن قراءته لحظية تقريبا . ويستخدم هذا الجهاز على نطاق واسع في الطب والصناعة على السواء .

مثال توضيحي ١٠ - ١ : درجة الحرارة في غرفة هي 77°F . ماهي درجة حرارة بالتدرج السلسيوس في هذه الغرفة ؟

طريقة الحل : تحل مثل هذه المسائل دائما بالطريقة الآتية :

١ - أوجد عدد درجات الحرارة الواقعة فوق أو تحت نقطة تجمد الماء (32°F أو 0°C) .

٢ - استخدم حقيقة أن الدرجة الفهرنهايتية تكافئ $\frac{5}{9}$ من درجة سلسيوس لتحويل الدرجات من أحد النوعين إلى الآخر .

٣ - أوجد درجة الحرارة على المقياس الجديد بإضافة (أو طرح) 32°F أو 0°C درجة الحرارة في هذه المسألة هي 77°F . وهذه الدرجة أعلى من درجة التجمد بمقدار 45°F . ولكن 45°F تكافئ $(\frac{5}{9} \times 45) = 25^{\circ}\text{C}$. إذن درجة الحرارة أعلى من نقطة التجمد بمقدار 25°C . وحيث أن نقطة التجمد هي 0°C فإن درجة الحرارة المطلوبة هي 25°C .

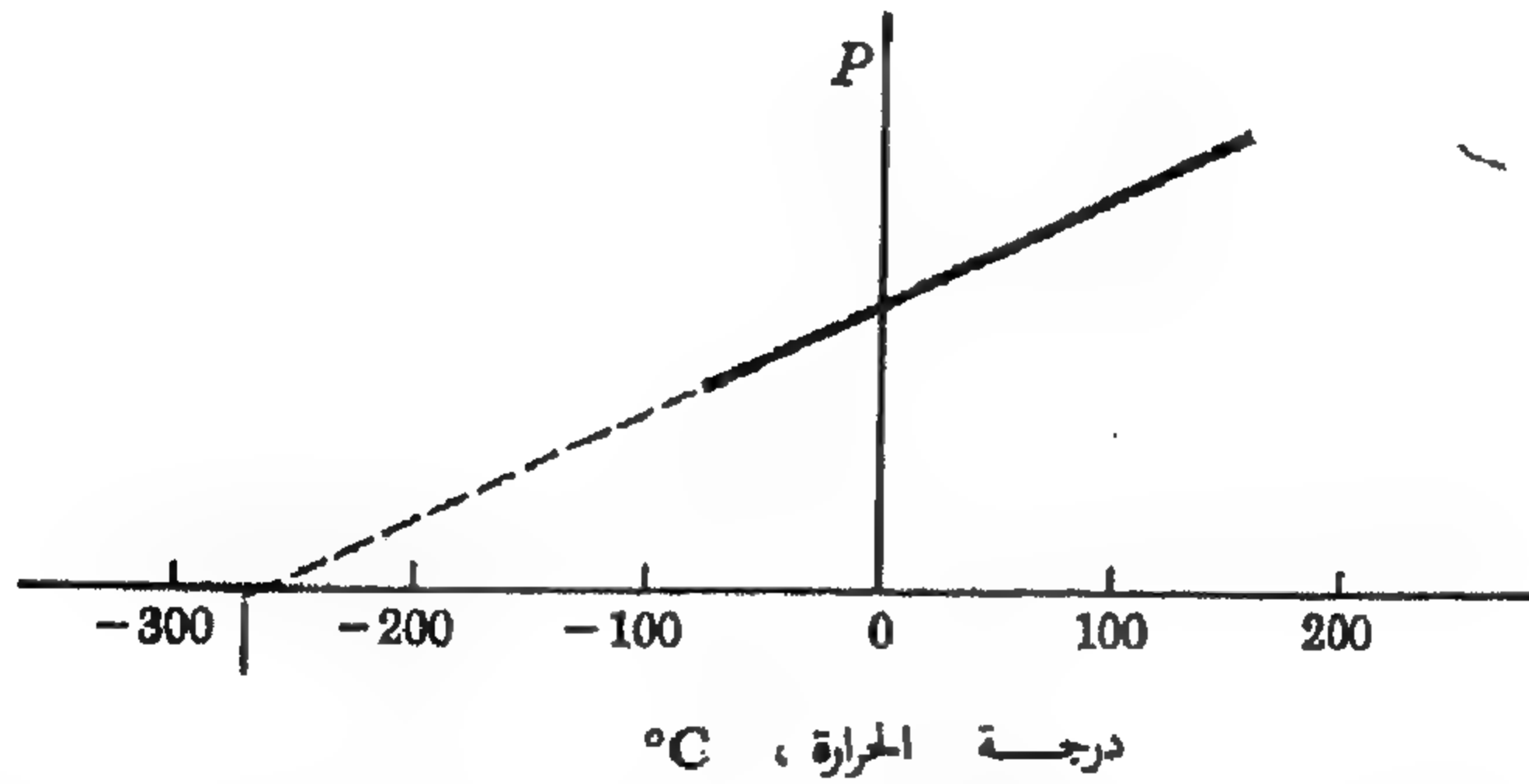
مثال توضيحي ١٠ - ٢ : ماهى درجة الحرارة على التدرج الفهرنهايتى فى يوم تكون فيه درجة الحرارة 10°C - ٩ ؟

طريقة الحل : درجة الحرارة فى هذا المثال أقل من درجة التجمد بمقدار 10°C .
 وحيث أن $1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}^{\circ}\text{C}$ ، فإن 10°C تكافئ $(10) \times (\frac{5}{9}) = 18^{\circ}\text{F}$. أى أن درجة الحرارة المطلوبة أقل من درجة التجمد بمقدار 18°F . وحيث أن درجة التجمد هى 32°F ، فإن الدرجة المطلوبة هى $32 - 18 = 14^{\circ}\text{F}$.

١٠ - ٣ قانون الغاز

يقوم كثير من الطلاب بإجراء تجارب بسيطة فى المختبرات العلمية بالمدارس والجامعات لتوضيح سلوك الغازات . والقانون الذى يحكم سلوك الهواء وكثير من الغازات بسيط ويمكن ايجاده بسهولة بالتجربة . ويحتوى هذا القانون على ثلاثة متغيرات هى الضغط ودرجة الحرارة وعدد الجزيئات فى وحدة الحجم . لتعرف الآن على الحقائق التى تخبرنا بها التجارب العلمية عن العلاقة بين هذه المتغيرات الثلاثة .

إذا سخنت كمية من الغاز مع حفظ حجمها ثابتا فإن ضغطها يزداد . ويبدو الشكل البياني الذى يمثل الضغط المقاس مقابل درجة الحرارة مشابها لما هو مبين فى الشكل ١٠ - ٣ بدرجة كبيرة . وتعطى مختلف الغازات ذات الضغوط الابتدائية المختلفة رسوما بيانية مشابهة . ولكن طالما لم تكن الغازات قريبة من ظروف إسالتها فإن الشكل البياني سيكون خطا مستقيما . بالإضافة إلى ذلك فإن الجزء من محور درجات الحرارة الذى يقطعه الخط هو -273.15°C دائما .



شكل (١٠ - ٣)

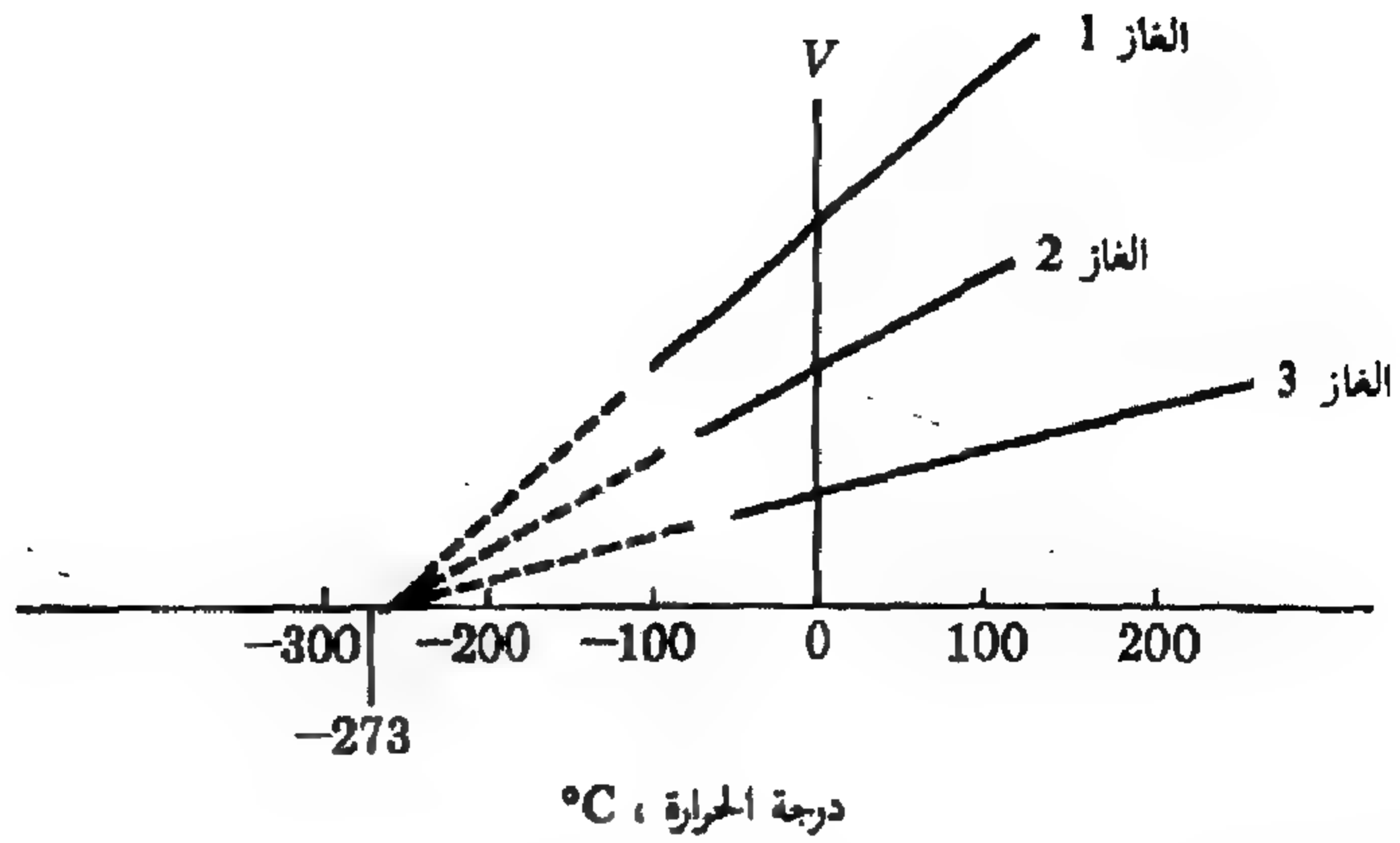
عند تسخين كمية من الغاز محبوسة فى وعاء يتغير ضغطها تغيرا خطيا مع درجة الحرارة . وفى المقياس المطلق يمكن كتابة معادلة هذا الخط على الصورة $P = (\text{const})(T)$

التجربة البسيطة الأخرى هى قياس حجم غاز كدالة فى درجة الحرارة مع حفظ ضغطه ثابتا . ويمثل الشكل ١٠ - ٤ الرسم البياني النموذجى للحجم المقاس مقابل لدرجة الحرارة . ومرة أخرى نحصل على علاقة خطية والجزء المحصور من الخط هو -273.15°C أيضا . وبالرغم من أن مختلف الغازات ومختلف الحجم تعطى خطوطا مختلفة (بشرط ألا يكون الغاز قريبا من الإسالة) فإن الجزء المحصور واحد دائما .

شكل (١٠ - ٤)

عندما ينكمش الغاز عند ضغط ثابت فإنه يبرد . وفي المقياس المطلق لدرجات الحرارة يمكن كتابة معادلة الخط المستقيم في حالة الغاز المثالي على الصورة

$$V = (\text{const})(T)$$



لاحظ أن الجزء المحصور من محور درجات الحرارة في كلا الشكلين ١٠ - ٣ و ١٠ - ٤ هو -273.15°C ، وتؤخذ هذه القيمة كنقطة الصفر على المقياس المطلق (أو مقياس كلفن) لدرجات الحرارة . لترمز إلى درجات الحرارة المطلقة بالرمز T . عندئذ يمكن تمثيل الشكلين البيانيين بالعلاقة .

$$PV = (\text{const})(T)$$

ولكى نتحقق مما إذا كان الشكل ١٠ - ٣ يحقق المعادلة السابقة يجب أن نتذكر أن V ثابت في هذه الحالة . إذن :

$$P = \left(\frac{\text{const}}{V} \right) (T) = (\text{const})(T)$$

وهي معادلة خط مستقيم في الشكل البياني الذي يمثل تغير الضغط P مع درجة الحرارة المطلقة T . ويلاحظ أن $P = 0$ عندما تكون $T = 0$ أي $t = -273.15^\circ\text{C}$ أي أن الشكل ١٠ - ٣ يحقق المعادلة . بالمثل ، إذا كان $P = \text{const}$ فإن المعادلة تصبح :

$$V = \left(\frac{\text{const}}{P} \right) (T) = (\text{const})(T)$$

وهي معادلة خط مستقيم يتقاطع مع محور درجات الحرارة عند $T = 0$ (أو $t = -273.15^\circ\text{C}$) . أي أن المعادلة تتفق مع البيانات الموضحة في الشكل ١٠ - ٤ .

نستنتج من ذلك أنه طالما كان الغاز بعيداً عن شروط إسالته فإنه يتبع . تعريف المعادلة :

$$PV = (\text{const})(T) \quad (١٠ - ١)$$

من المهم أن ندرك أن T هي درجة الحرارة المطلقة (كلفن) للغاز .

يعرف الغاز الذي يتبع المعادلة (١٠ - ١) بالغاز المثالي . وسنرى فيما بعد أن الثابت في المعادلة (١٠ - ١) ذو قيمة محددة يمكن إيجادها بسهولة . وقبل أن نبدأ مناقشة قيمة هذا الثابت يجب أولاً أن نقدم عددين يستخدمان عادة للتعبير عنه .

١٠ - ٤ الجزيء الجرامى (مول) وعدد أفوجادرو

عند التعامل مع الذرات والجزيئات يكون من المناسب عادة تذكر عدد ذى أهمية أساسية ، وهذا العدد يسمى عدد أفوجادرو ، ويمثل بالرمز N_A . وكان هذا العدد معروفاً للكيميائيين حتى قبل أن يعرف الكثير عن الذرات . وقد استنتج أفوجادرو من الطريقة التى تتحد بها الذرات لتكوين الجزيئات أن الكتلة الذرية* من المادة تحتوى دائماً على عدد معين من الذرات ، وهذا العدد هو N_A .

فمثلاً ، قد تذكر من علم الكيمياء أن الكتلة الذرية للايدروجين هي 1.0 . إذن ، 1 kg من الايدروجين يحتوى على عدد قدره N_A من ذرات الايدروجين . كذلك ، حيث أن الكتلة الذرية للكلور هي 35.5 ، فإن كل 35.5 kg من الكلور تحتوى على عدد قدره N_A من ذرات الكلور .

يستخدم نفس العدد في حالة الجزيئات . وحيث أن الكتلة الذرية للأكسجين هي 16 فإن الكتلة الجزيئية* للماء H_2O هي 18 . إذن ، يحتوى كل 18 kg من الماء على عدد قدره N_A من جزيئات الماء . وكما نرى فإن N_A عدد هام جداً .

لتعيين N_A يجب أن نلجأ إلى التجربة ، وأحسن قيمة تجريبية لعدد أفوجادرو أمكن الحصول عليها حتى الآن هي :

$$N_A = 6.022 \times 10^{26} \text{ particles/kg mol}$$

عدد أفوجادرو

لاحظ « الوحدات » التى ألحقت بالعدد N_A ، وتستخدم هذه « الوحدات » للأغراض الوصفية ولكنها ليست وحدات بالمعنى المفهوم . ويعطى معنى هذه الوحدات بالتعريف التالى : الجزيء الكيلوجرامى من المادة هو كمية المادة بالكيلوجرامات التى تحتوى على N_A من جسيمات المادة ، وهو يساوى عددياً الكتلة الذرية أو الجزيئية للذرات أو جزيئات المادة .

تعريف

* يستخدم كثير من الناس المصطلحين الفئتين « الوزن الذرى والوزن الجزيئى » بدلا من « الكتلة الذرية والكتلة الجزيئية » .

يعبر كثير من الناس عن عدد أفوجادرو N_A بوحدات أخرى ، فهم يستخدمون الجزيء الجرامى (g mol) بدلا من الجزيء الكيلوجرامى . وحيث أن الجرام يساوى $\frac{1}{1000}$ kg فإن :

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ particles/g mol}$$

وكثيرا جدا ماتحذف كلمة « الجرامى » فى هذا النظام للوحدات . فعندما تعطى كمية معينة بالمول فإن الكاتب أو المتحدث يعنى دائما الجزيئات الجرامية . ومع ذلك فإن الجزيء الكيلوجرامى هو المناسب فى نظام الوحدات SI ، لذلك يجب ألا ننسى أننا نستخدم الجزيئات الكيلوجرامية فى أسئلتنا .

مثال توضيحى ١٠ - ٣ : الكتلة الذرية للكربون هى 12.0 . اوجد كتلة ذرة الكربون بالكيلوجرام . (تعطى الكتل الذرية دائما بدون وحدات . ومع ذلك فإننا قد أضفنا « الوحدة » kg/kg mol للأغراض الوصفية) .

طريقة الحل : نعلم أن كل 120 kg من الكربون تحتوى على عدد من الجزيئات قدره N_A . إذن ، الكتلة لكل ذرة هى :

$$\frac{12.0 \text{ kg/kg mol}}{6.02 \times 10^{26} \text{ atoms/kg mol}} = \frac{12.0 \text{ kg/kg mol}}{N_A} = \text{الكتلة لكل ذرة كربون} = 1.99 \times 10^{-26} \text{ kg/atom}$$

ويمكن استخدام نفس هذه الطريقة لإيجاد كتلة أى ذرة أو جزيء بمعلومية الكتلة الذرية أو الجزيئية .

١٠ - ٥ ثابت قانون الغاز

لنعد الآن إلى قانون الغاز المثالى :

$$PV = (\text{const})(T)$$

حيث P ضغط كمية معينة من غاز مثالى حجمها V ودرجة حرارتها المطلقة T . ويمكن إيجاد قيمة الثابت بواسطة التجارب التى وصفناها فى الجزء ١٠ - ٣ ، وقد وجد أن قيمة هذا الثابت هى nR ، حيث n عدد الجزيئات الكيلوجرامية من الغاز فى حجم قدره V و :

$$R = 8314 \text{ J/(kg mol)(K)} = 8.314 \text{ J/(g mol)(K)}$$

يمكننا إذن كتابة قانون الغاز المثالى كمايلى :

$$PV = nRT$$

(١٠ - ٢)

من المهم جدا عند تطبيق هذا القانون أن نراعى استخدام الوحدات المناسب لمختلف الكميات المستخدمة . ويجب أن يعبر عن درجة الحرارة دائما بالكلفن . وإذا كان n عدد الجزيئات الكيلوجرامية في الحجم V ، فإن R يجب أن تكون $8314 \text{ J/(kg mol)(K)}$. أما إذا أردت لأي سبب أن تستخدم n بالجزيئات الجرامية فإن R يجب أن تكون $8.314 \text{ J/(g mol)(K)}$.

مثال توضيحي ١٠ - ٤ : الضغط الجوي ودرجة الحرارة العيارين هما $1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ و 0°C . اوجد الحجم الذي يحتله 1 kg mol من غاز النيتروجين N_2 في هذه الظروف ، علما بأن الكتلة الجزيئية للنيتروجين N_2 هي 28 .
طريقة الحل : لاستخدام قانون الغاز يجب أن نلاحظ في هذه الحالة أن :

$$P = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$T = 0 + 273.15 \text{ K} = 273.15 \text{ K}$$

حيث نقرأ القيمة الأخيرة هكذا « 273.15 درجة كلفن » . وحيث أننا نهتم بالحجم الذي يحتله 1 kg mol ، فإن $n = 1 \text{ kg mol}$. إذن المعادلة :

$$PV = nRT$$

تصبح :

$$(1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2)V = (1 \text{ kg mol}) \left[8314 \frac{\text{J}}{(\text{kg mol})(\text{K})} \right] (273 \text{ K})$$

ومنه نجد أن :

$$V = 22.4 \text{ m}^3/\text{kg mol}$$

يجب أن تكون قادرا على تعميم هذا المثال لإثبات مايلي :

يحتل الجزيء الكيلوجرامى الواحد من غاز مثالي حجما قدره 22.4 m^3 عند الضغط ودرجة الحرارة العيارين .

ومن المناسب أحيانا تذكر هذه الحقيقة .

١٠ - ٦ الأساس الجزيئي لقانون الغاز

ناقشنا حتى الآن ضغط الغازات من وجهتى نظر مختلفتين . وقد رأينا في الفصل السادس كيف تمارس جزيئات الغاز ضغطا على جدران الوعاء نتيجة لتصادمات

الجزئيات بها . وقد وجدنا أن الضغط يرتبط بطاقة حركة جزئيات الغاز . ويمكننا كتابة النتيجة التي توصلنا إليها ، باستخدام رموز مختلفة قليلا ، كمايلي :

$$P = \left(\frac{2}{3}\right)(\nu_0)\left(\frac{1}{2}m_0v^2\right) \quad (6 - 6)$$

حيث ν_0 عدد الجزئيات في وحدة الحجم . m_0 كتلة الجزيء الواحد ، $\frac{1}{2}m_0v^2$ متوسط طاقة حركة الجزيء . لاحظ أن درجة الحرارة لا تظهر في هذه المعادلة .

من ناحية أخرى ، ينص قانون الغاز المثالي ، المستنتج تجريبيا ، على أن :

$$PV = nRT \quad \text{أو} \quad P = \frac{nRT}{V}$$

ومقارنة هذه المعادلة بالمعادلة (6 - 6) نجد أن :

$$\left(\frac{2}{3}\right)\nu_0m_0v^2 = \frac{nRT}{V}$$

أو ، بعد إعادة الترتيب :

$$T = \frac{(\nu_0V)m_0v^2}{3nR}$$

ولكن ν_0V هو ببساطة العدد الكلي للجزئيات في الحجم V ، بينما n هو عدد الجزئيات الجرامية من الغاز في هذا الحجم . وحيث أن العدد الكلي للجزئيات في الحجم V يعطى أيضا بالكمية nN_A ، يمكننا إذن استبدال ν_0V بالكمية nN_A لنحصل على :

$$T = \frac{2N_A}{3R}\frac{1}{2}m_0v^2$$

وبالطبع فإن N_A/R ببساطة مقدار ثابت ، وقيمه هي :

$$\frac{N_A}{R} = \frac{6.02 \times 10^{26} \text{ kg mol}^{-1}}{8314 \text{ J/(kg mol)(K)}} = 7.24 \times 10^{22} \text{ K/J}$$

ويسمى مقلوب هذه الكمية ، أي R/N_A ، عادة ثابت بولتزمان ويرمز له بالرمز k . إذن :

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

وعلى أي حال فإننا نرى أن درجة الحرارة المطلقة للغاز المثالي تعطى بالعلاقة :

درجة الحرارة
المطلقة

(١٠ - ٣)

$$T = \frac{1}{2} m_0 v^2 \frac{2N_A}{3R}$$

إذن ، درجة الحرارة المطلقة مقياس لطاقة الحركة الانتقالية لجزيئات الغاز . وهذه حقيقة ذات أهمية كبيرة كما سنعلم حالا .

مثال توضيحي ١٠ - ٥ : احسب متوسط سرعة جزيئات النتروجين في الهواء في الظروف العيانية .

طريقة الحل : في الظروف العيانية تكون درجة الحرارة 0°C أو 273.15 K .

من المعادلة (١٠ - ٣) نجد أن :

$$v^2 = \frac{3RT}{N_A m_0}$$

لايجاد m_0 لجزيئات النتروجين يجب أن نلاحظ أن الكتلة الجزيئية لغاز النتروجين N_2 هي 28 . إذن :

$$m_0 = \frac{28 \text{ kg/kg mol}}{N_A}$$

وبالتعويض نجد أن :

$$v^2 = \frac{3RT}{28 \text{ kg/kg mol}}$$

وحيث أن $R = 8314 \text{ J/(kg mol)(K)}$ و $T = 273 \text{ K}$ ، نجد أن :

$$v^2 = \frac{(3)(8314)(273)}{28} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

أو :

$$v = 493 \text{ m/s}$$

أى أن متوسط سرعة جزيئات الهواء حوالى 500 m/s .

١٠ - ٧ استخدام قانون الغاز

وجد أن قانون الغاز المثالى ينطبق على جميع الغازات بشرط أن تتحقق الشروط التالية :

١ - يجب أن يكون الحجم الذى تشغله الجزيئات نفسها ، أى الجزيء الواحد مضروباً فى عدد الجزيئات ، جزءاً مهملاً من الحجم المحبوس فيه الغاز .

٢ - يجب أن تكون طاقة الحركة الانتقالية للغازات كبيرة بالمقارنة بالطاقة اللازمة لفصل جزيئين من الغاز عن بعضهما .

يتعلق الشرط الأخير بحقيقة أن الذرات والجزيئات غير المشحونة تتجاذب عادة مع بعضها البعض . نتيجة لذلك يحاول الجزيئان أن يلتصقا ببعضهما . ونجربنا الشرط الثانى أن الطاقة اللازمة لفصل جزيء عن الآخر يجب أن تكون صغيرة بالمقارنة بمتوسط طاقة حركتها الانتقالية .

ولكننا نعلم أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية للجزيء يرتبط مع درجة الحرارة المطلقة طبقا للمعادلة (١٠ - ٣) . يمكننا إذن إعادة صياغة الشرط الثانى بالطريقة التالية :

٢/ - يجب أن تكون درجة الحرارة عالية بدرجة كافية لأن نتأكد أن عددا قليلا فقط من الجزيئات تلتصق ببعضها البعض .

وبالطبع ، عندما تلتصق الجزيئات سويا ، فإن الغاز يتكثف ويتحول إلى سائل . وهذا يسمح لنا إذن بصياغة الشرط الثانى بطريقة أخرى :

٢// - يجب أن يكون الغاز بعيدا عن شروط إسالته .

يتحقق الشرط الثانى عادة فى حالة تلك الغازات كالهواء والأكسجين والنيتروجين والهليوم والأيدروجين وجميع الغازات صعبة الإسالة . ويتحقق الشرط الأول فى حالة الغازات التى كثافتها مقارنة بكثافة الهواء أو أصغر منها .

يمكننا رؤية إحدى السمات الهامة للمعادلة (١٠ - ٣) (والشكلين ١٠ - ٣ و ١٠ - ٤) إذا لاحظنا ما يحدث عند الصفر المطلق ($T = 0 K$) حيث أن T تتناسب مع طاقة الحركة الانتقالية للجزيئات ، إذن عندما يكون $T = 0$ فإن طاقة الحركة يجب أن تكون صفرا كذلك . أى أن الجزيئات تتوقف عن الحركة ، ولهذا فإنها لا تنسب أى ضغط . وهذا هو السبب فى أن $P = 0$ فى الشكل ١٠ - ٣ عندما تكون $T = 0$. هل يمكنك أن تشرح لماذا يكون $V = 0$ عندما تكون $T = 0$ كما هو مبين فى الشكل ١٠ - ٤ ؟

ولكن من المستحيل بالطبع تبريد أى غاز إلى الصفر المطلق بدون أن يتكثف . أى أن الشرطين الأول والثانى تبطل صحتهما قبل أن تقترب من درجة الحرارة $T = 0$ ، وعليه فإن معادلتنا (قانون الغاز المثالى) لا ينطبق . وفى الحقيقة فإن الغازات تسلك سلوكا غريبا بالقرب من الصفر المطلق . فى هذه الحالة لا تنطبق الفيزياء الكلاسيكية . وبدلا من ذلك ، كما سنرى لاحقا ، تصبح التأثيرات الكمية هامة ، وتؤدى إلى تلك الظواهر كفوق السيولة (سوائل صفرية اللزوجة) وفوق الموصلية (موصلات صفرية المقاومة الكهربائية) .

وبالرغم من هذه القيود على الغاز المثالي فإن مجال تطبيق هذا القانون واسع جدا .
ويعتبر استخدام هذا القانون لتعريف مقياس كلفن لدرجات الحرارة واحدا من تطبيقاته
الأساسية . لتحقيق ذلك يجب أن نذكر أن قانون الغاز يمكن كتابته على الصورة :

$$P = (\text{const})(T)$$

إذا كان الحجم V ثابتا . فإذا أمكن إيجاد قيمة الثابت فإن T يمكن حسابها من
قياس الضغط P .

لإيجاد قيمة هذا الثابت اتفق في عام ١٩٥٤ على أن درجة الحرارة 273.16 K هي
النقطة الثلاثية للماء . (النقطة الثلاثية للماء هي درجة الحرارة الوحيدة التي يتواجد
فيها الماء والثلج وبخار الماء سويا في آن واحد) . افترض الآن أن الضغط في وعاء ثابت
الحجم يحتوي على غاز مثالي قد قيس عند النقطة الثلاثية للماء . عندئذ سيكون P
معلوما ودرجة الحرارة $T = 273.16 \text{ K}$ من التعريف . إذن يمكن تعيين قيمة الثابت في
المعادلة $P = (\text{const})(T)$.

وحيث أن الثابت معلوم فإن الغاز الموجود في الوعاء يمكن استخدامه لقياس درجة
الحرارة . لتحقيق ذلك يقاس الضغط P ثم يعرض في العلاقة $P = (\text{const})(T)$
ببساطة لإيجاد T . وبالطبع يستخدم الترمومتر الغازي نادرا لأنه غير مناسب . ولكن
عندما تدعو الحاجة يمكن استخدام الترمومتر الغازي لمعايرة أى نوع آخر من
الترموترات يراد استخدامه .

ويعتبر قانون الغاز المثالي أكثر نفعا للكثير منا من ناحيتين أخريين إذ يمكننا
استخدامه لحساب P أو V أو n أو T إذا كانت جميع الكميات معلومة عدا واحدة
فقط . كذلك إذا كانت الكميات P و V و n و T معلومة تحت مجموعة معينة من
الشروط فإن من الممكن حساب هذه الكميات تحت شروط أخرى . وتوضح الأمثلة
الآتية هذه الاستخدامات .

مثال توضيحي ١٠ - ٦ : أغلق برميل فارغ عند درجة حرارة 20°C . وضع
البرميل بعد ذلك في الشمس وترك حتى ارتفعت درجة حرارته إلى 200°C فإذا كان
الضغط الابتدائي 1.0 atm ، فما هو الضغط النهائي في البرميل ؟

طريقة الحل : تكتب المعادلة (١٠ - ٦) مرتين :

$$P_1 V = nRT_1 \quad P_2 V = nRT_2$$

حيث V هو الحجم الثابت للبرميل ، n عدد الجزيئات الجرامية من الغاز في
البرميل . بقسمة إحدى المعادلتين على الأخرى نحصل على :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

حيث T_1 ، T_2 هما درجتى الحرارة المطلقتان . ولكن $P_1 = 1 \text{ atm}$ ،
 $T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K}$ ، $T_2 = 473 \text{ K}$. إذن :

$$P_2 = (1.0 \text{ atm}) \left(\frac{473 \text{ K}}{293 \text{ K}} \right) = 1.61 \text{ atm}$$

لاحظ أننا قد استخدمنا درجتى الحرارة المطلقتين . ووحدات الضغط ليست هامة طالما كانت واحدة .

مثال توضيحي ١٠ - ٧ : ضغط الغاز الموجود فى كباس محرك ديزل فجأة عندما كانت درجة حرارته 27°C وضغطه 74 cm Hg فى البداية . فإذا كان الضغط النهائى للغاز 3700 cm Hg ودرجة حرارته النهائية 547°C ، فما هو الحجم النهائى للغاز بدلالة الحجم الابتدائى ؟
 طريقة الحل . يكتب قانون الغاز مرتين :

$$P_1 V_1 = nRT_1 \quad P_2 V_2 = nRT_2$$

بالتقسمة نحصل على :

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

وبالتعويض نجد أن :

$$\left(\frac{V_1}{V_2} \right) \left(\frac{74}{3700} \right) = \frac{273 + 27}{273 + 547}$$

ومنه :

$$V_2 = 0.058 V_1$$

مثال توضيحي ١٠ - ٨ : نفخ إطار سيارة إلى ضغط قدره 32 lb/in^2 فى يوم بارد درجة الحرارة فيه -3°C . ماهو الضغط فى الإطار عندما ترتفع درجة الحرارة فى الإطار إلى $+47^\circ\text{C}$ (افترض أن حجم الإطار يظل ثابتاً) .

طريقة الحل . مرة أخرى :

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

ولكن $V_1 = V_2$ ، $T_1 = 270 \text{ K}$ ، $T_2 = 320 \text{ K}$. لاحظ أن مقياس ضغط إطارات السيارات يقرأ زيادة الضغط داخل الإطار عن الضغط الجوى . (فإذا كان

الضغط الداخلى هو الضغط الجوى فإن المقياس يقرأ صفراً . وبفرض أن الضغط الجوى هو 14.7 lb/in^2 ، إذن $P_1 = 46.7 \text{ lb/in}^2$ ومن ثم :

$$P_2 = \frac{P_1 T_2}{T_1} = (46.7 \text{ lb/in}^2) \left(\frac{320 \text{ K}}{270 \text{ K}} \right) = 55.4 \text{ lb/in}^2$$

أى أن قراءة المقياس ستكون 40.7 lb/in^2 .

مثال توضيحي ١٠ - ٩ : إذا كان حجم خزان لغاز الأكسجين هو 4 liters^* عند درجة حرارة قدرها 0°C وضغط قدره 50 atm ، فما هي كتلة الأكسجين الموجود في الخزان ؟

طريقة الحل . سنحل هذه المسألة بطريقتين مختلفتين :

الطريقة الأولى : سنوجد أولاً الحجم الذى يشغله هذا الغاز عند درجة الحرارة والضغط العياريين :

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2} = 1$$

$$(50 \text{ atm})(4 \text{ liters}) = (1 \text{ atm})(V_2)$$

$$V_2 = 200 \text{ liters} = 0.20 \text{ m}^3$$

ولكن 22.4 m^3 تحتوى على 1 kg mol من غاز الأكسجين O_2 عند هذه الظروف . وحيث أن الكتلة الذرية للأكسجين 16 وكتلته الجزيئية 32 ، إذن كتلة الأكسجين الموجودة في الخزان هي :

$$\begin{aligned} \text{الكتلة} &= \left(\frac{0.2 \text{ m}^3}{22.4 \text{ m}^3/\text{kg mol}} \right) (32 \text{ kg/kg mol}) \\ &= 0.285 \text{ kg} = 285 \text{ g} \end{aligned}$$

والطريقة الثانية : نستخدم قانون الغاز مباشرة ، أى المعادلة (١٠ - ٢) :

$$PV = nRT$$

ثم نعوض عن P بالمقدار $(1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(50)$ وعن V بالمقدار $4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ بوضع $R = 8314 \text{ J/(kg mol)(K)}$ ، $T = 273 \text{ K}$ ، نجد أن :

$$n = 8.9 \times 10^{-3} \text{ kg mol}$$

ولكن 1 kg mol من الأكسجين هو 32 ، إذن كتلة الغاز الموجود في الخزان ببساطة هي :

$$\text{Mass} = (8.9 \times 10^{-3} \text{ kg mol})(32 \text{ kg/kg mol}) = 0.285 \text{ kg}$$

* يعرف اللتر ، وهو وحدة معروفة لك من الكيمياء ، بأنه حجم قدره 1000 cm^3

مثال توضيحي ١٠ - ١٠ : ماقيمة كتلة الجزيء الواحد من ثاني اكسيد الكربون CO_2 ؟

طريقة الحل . الكتلة الذرية للكربون 12 وللاكسجين 16 . إذن الكتلة الجزيئية لثاني أكسيد الكربون CO_2 هي 44 وحيث أن 44 kg من ثاني أكسيد الكربون CO_2 تحتوي على عدد أفوجادرو من الجزيئات أي 6.02×10^{26} ، إذن كتلة الجزيء هي :

$$m_0 = \frac{44 \text{ kg}}{6.02 \times 10^{26}} = 7.33 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

١٠ - ٨ تغير السرعات الجزيئية في الغازات :

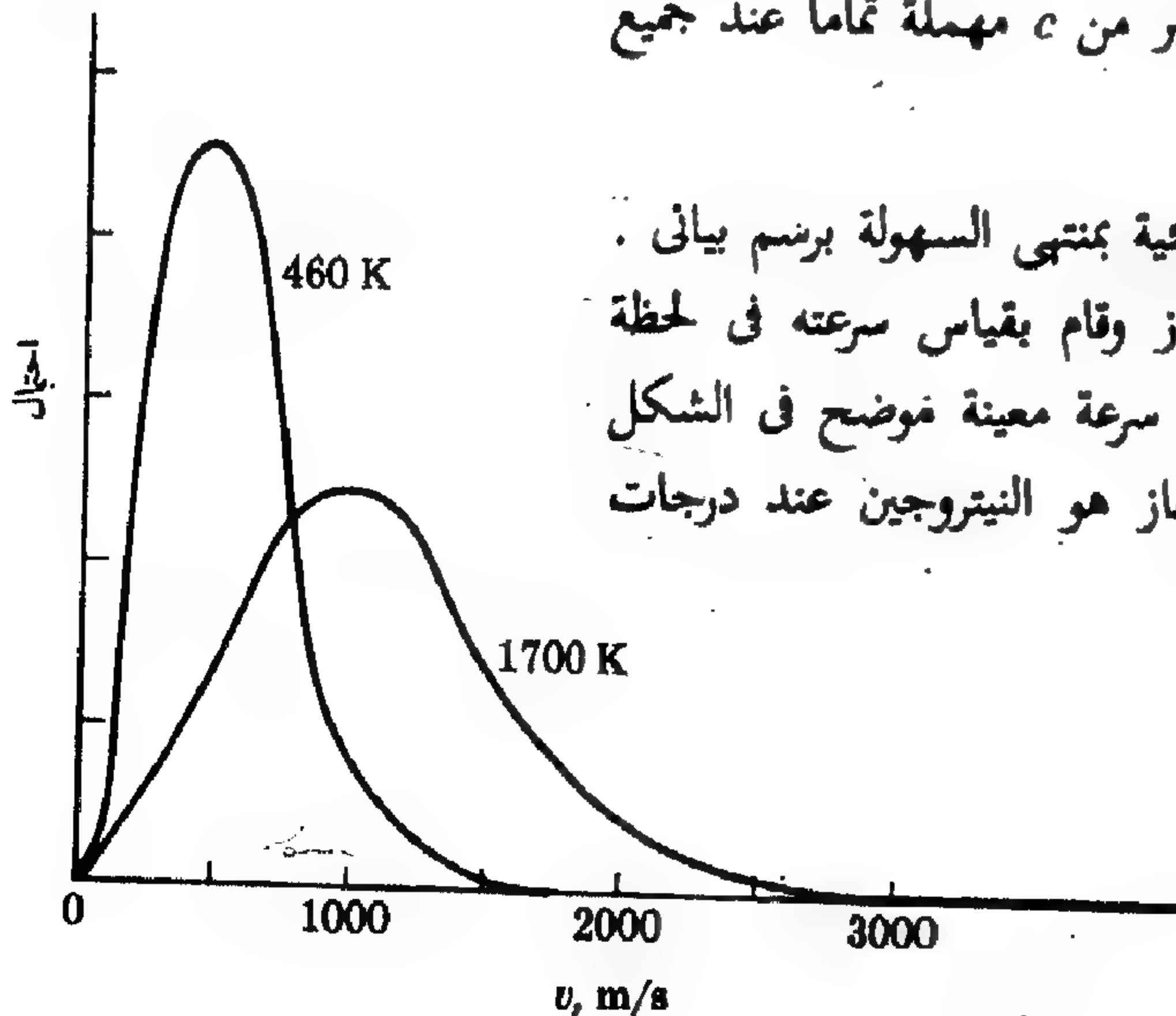
رأينا في الاجزاء السابقة أن درجة الحرارة مقياس لطاقة الحركة الجزيئية . وبالتحديد ، نرى من المعادلة (١٠ - ٣) أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزيء الغاز هي ببساطة :

$$\text{طاقة الحركة الانتقالية} = \frac{1}{2} m_0 v^2 = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{R}{N_A} \right) T = \frac{3}{2} kT \quad (١٠ - ٤)$$

حيث k ثابت بولتزمان ، أي R/N_A . ولكننا نعلم بالطبع أن جميع الجزيئات لا تتحرك بنفس السرعة وأن طاقات حركتها ليست متساوية . بالإضافة إلى ذلك فإن سرعة جزيء معين عرضة للتغير نتيجة لتصادمات الجزيئات بعضها ببعض .

شكل (١٠ - ٥)

احتمال أن يتحرك جزيء النيتروجين في غاز بسرعة معينة عند درجة الحرارة المينة يتناسب مع ارتفاع المنحنى عند هذه السرعة المحددة .



وقبل أن يكتسب العلماء المهارات العملية التي تمكنهم من قياس سرعات جزيئات الغاز مباشرة استطاع جيمس كليرك ماكسويل أن يتنبأ بها . وقد أثبت ، نظريا على الأقل ، أن جزيء الغاز يستطيع أن يصل إلى أية سرعة بين الصفر واللانهاية . ونحن نعلم الآن أن أى جسم لا يمكن أن يتحرك بسرعة تزيد عن سرعة الضوء c . بناء على ذلك فإن التنبؤ المتعلق بالسرعة اللانهاية خطأ واضح . ومع ذلك فإن تنبؤهم قد أثبت أن فرصة (أو احتمال) أن تكون سرعة الجزيء أكبر من c مهملة تماما عند جميع درجات الحرارة العادية ، رغم أنها لازالت محدودة .

يمكن توضيح تنبؤ ماكسويل عن السرعات الجزيئية بمنتهى السهولة برسم بياني . افترض أن شخصا قد اختار جزيئا معينا من الغاز وقام بقياس سرعته في لحظة الاختيار . واحتمال (أو فرصة) أن يكون للجزيء سرعة معينة موضح في الشكل ١٠ - ٥ ، وقد افترضنا لأغراض هذا المثال أن الغاز هو النيتروجين عند درجات

الحرارة المبينة . ونحن نرى من الشكل أن الاحتمال الأكبر هو أن تكون سرعة جزيئات النيتروجين قريبة من 500 m/s عند درجة الحرارة 460 K (187°C) . ومع ذلك فإن مدى السرعات الممكنة واسع جدا . ولا يجب أن ندهش عندما نجد أن سرعة الجزيء المختار تساوى أى قيمة بين حوالى 50 m/s و 1500 m/s . وكما ذكرنا سابقا ، لاتصل المنحنيات فى الحقيقة إلى الصفر حتى إذا وصلت السرعات إلى ما لانهاية . ولكن ، كما نرى ، فرصة وجود جزيء يتحرك بمثل هذه السرعة العالية صغيرة إلى أبعد حد ، وهى فى الواقع مهمة تماما فى الحالة الموضحة .

لم يكن فى الإمكان اختبار تنبؤات ماكسويل (التى أعلنها فى عام ١٨٦٠) عمليا إلا فى عام ١٩٢٦ . وعندما أجرى هذا الاختبار وجد أن التجربة تتفق اتفاقا ممتازا مع نتائج نظرية ماكسويل ، وقد أكدت التجربة أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزيء الغاز يساوى $\frac{3}{2}kT$ ، كما أنها أوجدت أيضا توزيع السرعات الذى تنبأ به ماكسويل .

١٠ - ٩ الحركة البروانية

تعتبر المفاهيم الجزيئية التى استخدمناها فى مناقشة قانون الغاز المثالى مفاهيم ذات أهمية تطبيقية كبيرة فى كثير من المجالات ، فكما رأينا حالا استطاع ماكسويل أن يتنبأ بتغير السرعات الجزيئية فى الغاز باستخدام هذه المفاهيم . وقد أمكن معالجة كثير من الأوجه الأخرى لسلوك الغازات بنجاح باستخدام نموذج الغاز المثالى . وفى الحقيقة فإن هذه النتائج لما يسمى النظرية الحركية للغازات قد أثبتت بكثير من التجارب العلمية المختلفة .

فى هذا الجزء ، وكذلك فى الجزئين التالين ، سوف تناقش تطبيقات هذا النموذج على أنظمة لانعاملها عادة باعتبارها غازات . اعتبر جسيمات الدخان أو الغبار الدقيقة الموجودة فى الهواء أو الدقائق الغروانية (شبه الغروية ، كتلك التى تجعل الماء غير النقى عكر قليلا أو تجعل اللبن أبيض اللون) . تتصرف كل من هذه الجسيمات الدقيقة « كجزيء غازى » وتعطى طاقة حركتها الانتقالية بالمعادلة (١٠ - ٤) ، أى بالمقدار $\frac{3}{2}kT$. فإذا كانت طاقة الحركة هذه أكبر كثيرا من طاقة الوضع الثقالية للجسيم فإن الجسيمات لن ترسب وتترام على قاع الوعاء . ولكنها سوف تطفو فى الهواء (فى حالة الغبار) أو السائل (فى حالة الدقائق الغروانية) كما لو كانت جزيئات غاز عادى تماما .

شكل (١٠ - ٦)
تتحرك الجسيمات الدقيقة
المعلقة فى مائع حركة متعرجة
تسمى الحركة البروانية .

وإذا نظرت إلى دقيقة الغبار أو الدقيقة الغروانية فى الميكروسكوب فإنك سترى أنها تتبع مسارا مغلولا كالمسار المبين فى الشكل ١٠ - ٦ ، وهذه الحركة عشوائية . وقد كان روبرت بروان - وهو عالم نبات - أول من اكتشف هذا النوع من الحركة ، ويسمى الحركة البروانية . أما النظرية التفصيلية لهذه الظاهرة



فقد نشرها البرت اينشتين . (نشر اينشتين هذه النظرية في عام ١٩٠٥ وهو نفس العام الذى اقترح فيه نظريتين شهيرتين آخرين هما النظرية النسبية ونظرية التأثير الكهربائى الضوئى) . وبالرغم من أن الدقائق أكبر كثيرا من جزيئات الغاز . فإن الأفكار العامة تنطبق على كليهما ، ذلك لأن هذه الدقائق تتصرف كغاز مثالى فى كثير من الوجوه .

من المهم أن نلاحظ بعناية سبب الحركة المتعرجة . حيث أن الجسيمات تتحرك بين كثير من الجزيئات المحيطة قبل تغيير مسارها ، فإن نقط تغير الاتجاه لا تمثل نقط تصادم . ولكنها تمثل النقط التى تكون فيها محصلة القوى التى تؤثر بها الجزيئات المحيطة على الجسيم كبيرة بمحض الصدفة . وبالرغم من أن القوة المحصلة التى تؤثر بها الجزيئات المحيطة على الجسيم قريبة من الصفر فى معظم الأحيان ، فإن الحال ليست كذلك دائما . فمن حين إلى آخر ، وبمحض الصدفة ، تصبح محصلة هذه القوة كبيرة . عندئذ ينحرف الجسيم تحت تأثير هذه القوة المحصلة الكبيرة .

يمكننا أن نفهم هذه الظاهرة بطريقة أفضل بالقياس والمقارنة . افترض أنك قد القيت 100 قطعة عملة معدنية على أرضية الغرفة ثم رمزت للقطعة التى تظهر فيها الصورة على الوجه العلوى بالرقم 1+ وللقطعة التى تظهر فيها الكتابة على الوجه العلوى بالرقم 1- ، عادة يكون عدد الأوجه العلوية التى تظهر عليها الصورة أو الكتابة واحدا تقريبا ، وبالتالي فإن المحصلة تكون عادة قريبة من الصفر . ولكن يحدث من حين إلى آخر أن يكون عدد الأوجه العلوية التى تظهر عليها الصورة أو الكتابة أكبر بدرجة ملحوظة من الآخر . فى هذه الحالة تكون المحصلة كبيرة . نرى من ذلك إذن أن التأثيرات العشوائية التى تتعادل عادة لا تتعادل فى بعض الأحيان .

والحركة البروانية ظاهرة هامة فى كثير من الوجوه . فهى تحدث فى جميع الأنظمة الغروانية . ولكنها - من وجهة نظر أساسية - تزودنا بوسيلة مرئية لمشاهدة الخواص الجزيئية للغاز المثالى . وقد كانت الحركة البروانية للجسيمات الغروانية هى الوسيلة التى مكنتنا من الحصول على أول برهان مباشر للنظرية الحركية للغازات . بالإضافة إلى ذلك فإن واحدة من أولى قياسات عدد أفوجادرو قد أجريت بواسطة تجربة عملية متعلقة بحركة الجسيمات الغروانية.

١٠ - ١٠ الضغط الأوزموزى

باستخدام أفكار ومبادئ النظرية الحركية للغازات يمكننا أن نستنتج استنتاجا هاما فيما يتعلق بمخلوط غازى يتكون من غازين أو أكثر ، وقد كان دالتون أول من صاغ هذا الاستنتاج الذى يعرف بقانون دالتون للمضغوط الجزئية .

الضغط الكلى لمخلوط من الغازات المثالية يساوى مجموع الضغوط التى يسببها كل من هذه الغازات على حده .

باسلوب آخر ، لنفترض أن كميات معينة من غازات النيتروجين N_2 والهيدروجين H_2 والأكسجين O_2 قد وضعت فى وعاء حجمه V . لنفترض كذلك أن نفس الكمية من غاز النيتروجين سوف تسبب ضغطاً قدره P_N إذا وضعت وحدها فى نفس الوعاء . بالمثل ، لنعتبر أن P_H و P_O هما الضغطان المعينان بنفس الطريقة لغازى الهيدروجين H_2 والأكسجين O_2 على الترتيب . إذن ، يخبرنا قانون دالتون أن الضغط الكلى لمخلوط هذه الغازات سيكون :

$$P = P_N + P_H + P_O$$

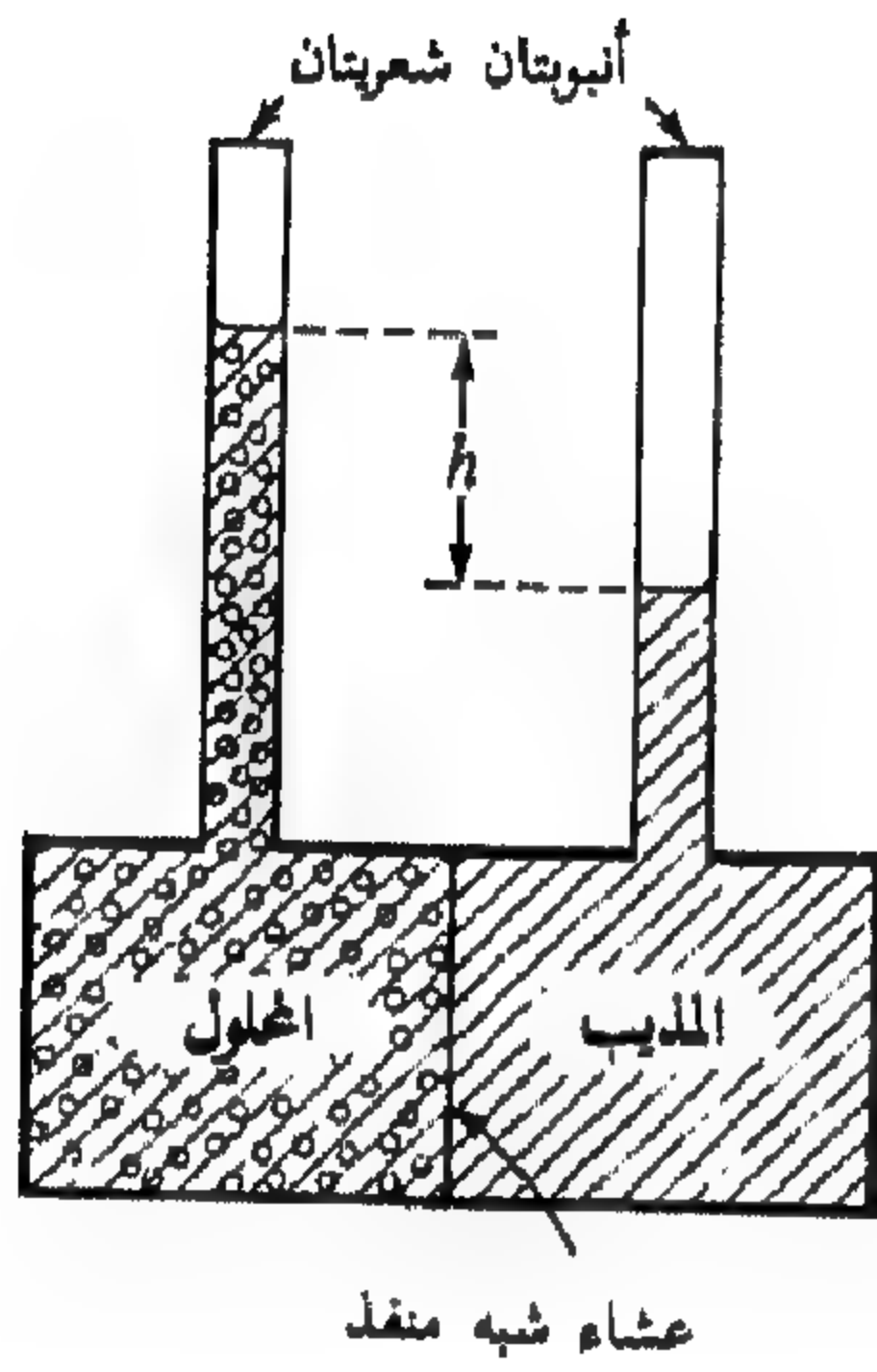
نرى من ذلك إذن أن كلا من هذه الغازات الثلاثة لايتأثر بوجود الغازين الآخرين طالما كنا نهتم بالضغط . وهذا ليس بغريب لأن قانون الغاز المثالى ينطبق على جميع الغازات المثالية عند أى ضغط . ويخبرنا هذا القانون أن $P \propto n$ ، أى أن الضغط يتناسب مع عدد الجزيئات الجرامية للغاز فى الوعاء . ويلاحظ أن القانون لايمتوى على أى كمية تعتمد على نوع الغاز المعنى ، ذلك لأن 1 mol من النيتروجين N_2 مضافاً إلى 1 mol من الهيدروجين H_2 فى الوعاء يعطيان نفس الضغط الذى يسببه 2 mol من أى من غازى النيتروجين N_2 أو الهيدروجين H_2 . وفى الحقيقة فإن قانون الغاز المثالى يتنبأ بقانون دالتون للضغط الجزئية .

ولكننا رأينا أيضاً أن النظرية الحركية للغازات تنطبق على حركة الجسيمات الغروانية . من المتوقع ، إذن ، أن قانون الغاز المثالى يجب أن ينطبق على المحاليل الجزيئية والمحاليل الغروانية على السواء . يمكننا أن نخمن إذن أن الجزيئات المذابة لتكون محلولاً مخففاً يجب أن تسلك سلوك الغاز المثالى ، وقد ثبت أن هذا صحيح ويؤدى إلى مايعرف بالضغط الأوزموزى . لنفحص الآن مفهوم الضغط الأوزموزى ذا النفع الكبير .

لدراسة ظاهرة الضغط الأوزموزى يمكنك إجراء تجربة بسيطة - قد تكون أجريتها بالفعل عندما كنت فى المدرسة الإعدادية أو الثانوية - باستخدام جزرة مجوفة وكمية صغيرة من الماء السكرى الملون . يجلس الماء السكرى الملون داخل الجزرة المجوفة بحيث يمكنه الارتفاع فى أنبوبة شعرية مثبتة بإحكام أعلى الجزرة . وعندما تغمر الجزرة جزئياً فى كأس به ماء نقى يشاهد سلوك غريب لافت للنظر ، إذ ينفذ بعض الماء خلال جدار الجزرة ويدخل إلى الماء السكرى . وهذا يسبب ارتفاع الماء السكرى فى الأنبوبة الشعرية . وعندما يتوقف مرور الماء خلال جدار الجزرة يلاحظ أن مستوى سطح الماء

السكري في الأنبوبة الشعرية أعلى كثيرا من مستوى سطح الماء في الكأس . نستنتج من ذلك الضغط النهائي داخل الجزرة أكبر كثيرا من الماء في الكأس ، ذلك لأن الماء الموجود في الكأس قد تسرب من منطقة ذات ضغط منخفض إلى منطقة ذات ضغط أعلى ، وسوف نرى أن الفرق بين الضغطين داخل الجزرة وخارجها هو ما يسمى الضغط الأوزموزي . وسوف نصف هنا نسخة أكثر دقة من هذه التجربة ، وهي تستخدم لقياس الكتل الجزيئية للبروتينات وجزيئات البوليمرات والجزيئات الكبيرة الأخرى . ويستخدم في هذه التجربة الجهاز الذي سوف نصفه الآن .

يتكون الأوزمومتر من غرفتين يفصلهما غشاء شبه منفذ رقيق جدا ، كما هو مبين في الشكل ١٠ - ٧ . في التجربة المدرسية السابق ذكرها كانت فجوة الجزرة تمثل الغرفة الأولى ، بينما كان الكأس الذي تغمر فيه الجزرة يمثل الغرفة الثانية . أما جدار الجزرة فإنه يقوم بعمل الغشاء شبه المنفذ . وتستخدم الأوزمومترات الحديثة ألواحاً رقيقة جدا من البلاستيك تتنفخ في المذيب المستخدم لتحضير المحلول المراد قياسه ولكنها لا تذوب فيه + . ويجب أن يختار الغشاء بعناية فائقة بحيث تمر خلاله جزيئات المذيب ولا تمر خلاله جزيئات المذاب . لهذا السبب يقال أن الغشاء شبه منفذ .



عندما يملأ الجهاز المبين في الشكل ١٠ - ٧ كما هو موضح ، يعدل المستويان في الغرفتين وضعيهما ويصلان في نهاية الأمر إلى حالة التوازن . ذلك لأن جزيئات المذيب تنفذ خلال الغشاء (إما خارجة من المحلول أو داخله فيه) ويستمر ذلك حتى يصبح ضغط المذيب واحدا على جانبي الغشاء . لاحظ جيدا أن جزيئات المذاب لا تمر خلال الغشاء شبه المنفذ . ويصل النظام إلى حالة التوازن فقط عندما يتساوى ضغط المذيب على الجانبين . لنفرض أن الضغط على الغشاء نتيجة لجزيئات المذيب هو P_s .

شكل (١٠ - ٧)
الضغط الأوزموزي للمذاب
في المحلول المخفف جدا
يساوي hdg ، حيث d
كثافة المحلول أو المذيب
(الكثافتان متساويتان
تقريبا) .

ولكن الضغط على الجانب الأيسر من الغشاء ناتج من المذيب بالإضافة إلى جزيئات « غاز » المذاب . لنرمز إلى ضغط « غاز » المذاب هذا بالرمز π . إذن ، بتطبيق قانون دالتون نجد أن الضغط الكلي على الجانب الأيسر هو :
$$P_s + \pi = \text{الضغط على الجانب الأيسر}$$

ولكن الضغط على الجانب الأيمن ناتج من المذيب النقي فقط ، وهو أيضا يساوي P_s طالما أن التوازن قد تحقق . إذن :

$$P_s = \text{الضغط على الجانب الأيمن}$$

نرى الآن أن هناك فرقا في الضغط الكلي على جانبي الغشاء ، ويسمى هذا الفرق في
تعريف الضغط على جانبي الغشاء الضغط الأوزموزي ، وهو :

$$\text{Osmotic pressure} = (\pi + P_s) - P_s = \pi$$

بتعبير آخر ، الضغط الأوزموزي هو ببساطة ضغط « غاز » المذاب في
المحلول . ويمكن قياسه باستخدام الأوزمومتر بقياس الارتفاع h في الشكل ١٠ - ٧ .
وحيث أن الضغط الأوزموزي يساوي الفرق في الضغط ، إذن $\pi = h d g$ ، حيث d
كثافة المحلول المخفف جدا . (الفرق بين كثافتى المحلول والمذيب يمكن إهماله
عمليا) .

لنعد الآن إلى قانون الغاز المثالي . يعطى ضغط « غاز » المذاب بقانون الغاز
المثالي بحيث يكون المحلول مخففا جدا . إذن شروط تطبيق قانون الغاز المثالي متحققة
في هذه الحالة . إذن يمكننا أن نكتب العلاقة التالية :

$$\pi V = nRT$$

حيث n عدد الجزيئات الكيلوجرامية من المذاب في الحجم V . وإذا رمزنا للكتلة
(أو الوزن) الجزيئي للمذاب بالرمز M ، فإن :

$$n = \frac{m}{M}$$

حيث m كتلة المذاب في الحجم V
وبتبسيط معادلة « غاز » المذاب نحصل على العلاقة :

$$\pi = \left(\frac{m}{V} \right) \left(\frac{RT}{M} \right)$$

ولكن m/V هو تركيز المحلول (بالكيلوجرام لكل متر مكعب) ، لنرمز للتركيز بالرمز
 c . إذن :

$$\pi = \frac{cRT}{M} = \text{الضغط الأوزموزي للمحلول المخفف} \quad (١٠ - ٥)$$

وكما نرى فإن الضغط الأوزموزي يكون كبيرا إذا كان الوزن الجزيئي
للمذاب صغيرا . ولكن إذا كانت الجزيئات صغيرة جدا فسيكون من الصعب أن
نجد الأغشية المناسبة التي تنفذ المذيب دون المذاب .

وهكذا يمكننا استخدام الأوزمومتر والمعادلة (١٠ - ٥) لإيجاد الوزن الجزيئي M لجزيء المذاب . محل المعادلة بالنسبة إلى M ، نجد أن :

$$M = \frac{c}{\pi} RT$$

وعليه ، يمكن إيجاد M بقياس الضغط الأوزموزي π لمحلول معلوم التركيز c . وعمليا يجب أن يكون التركيز c صغيرا بدرجة كافية حتى تسلك جزيئات المذاب مسلك غاز مثالي . وتستخدم الأوزمومترات عادة لقياس الكتل الجزيئية للجزيئات في المدى من حوالي 5000 إلى بضعة ملايين .

مثال توضيحي ١٠ - ١١ : الزلال أحد الجزيئات البروتينية الموجودة في بلازما الدم . قيس الضغط الأوزموزي لمحلول مائي منه يحتوي على 0.20 g من الزلال في كل 100 cm³ فوجد أنه يساوي 0.74 سنتيمترا من الماء عند درجة 27°C . اوجد من هذه البيانات الكتلة الجزيئية أو الوزن الجزيئي لجزيء الزلال .

طريقة الحل . يمكننا استخدام المعادلة (١٠ - ٥) لحل هذا المثال . حيث أن π هو 0.74 سنتيمترا من الماء ، فإن المعادلة :

$$\pi = h d g$$

تصبح :

$$\pi = (0.74 \times 10^{-2} \text{ m})(1000 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2) = 72.5 \text{ N/m}^2$$

إذن ، من قانون الغاز المثالي :

$$M = \left(\frac{c}{\pi} \right) RT$$

ولكن :

$$c = \frac{0.20 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3} = 2.0 \text{ kg/m}^3$$

$$T = 273 + 27 = 300 \text{ K}$$

و :

إذن ، بالتعويض عن القيم السابقة وعن R بالقيمة 8314 J/K نجد أن :

$$M = 69,000$$

وهي الكتلة الجزيئية للزلال .

ملخص .

ترتبط الطاقة الحرارية بطاقة حركة المادة . كلما كانت المادة أكثر سخونة كانت طاقة حركة جزيئاتها أكبر . تستخدم الترمومترات لقياس درجة الحرارة . هناك ثلاثة مقاييس شائعة لدرجات الحرارة . في مقياس سلسيوس (أو المقياس المئوي) (°C) تعتبر درجة تجمد الماء 0°C ودرجة غليانه 100°C . في مقياس كلفن (أو المقياس المطلق) (K) هاتان النقطتان هما 273.15 K و 373.15 K . في مقياس فهرنهايت (°F) هاتان النقطتان هما 32°F و 213°F . تكافئ الدرجة الواحدة في مقياس سلسيوس (أو كلفن) $\frac{9}{5}$ درجة فهرنهايت .

تتبع معظم الغازات قانون الغاز المثالي وتسمى الغازات المثالية . هذا القانون هو $PV = nRT$ ، حيث n عدد الجزيئات الجرامية الموجودة في حجم من الغاز قدره V عند ضغط قدره P . يجب أن تكون درجة الحرارة T مقاسة على مقياس كلفن (أى المقياس المطلق لدرجات الحرارة) . ويرمز الحرف R لثابت الغاز بقيمته $8314 \text{ J/(kg mol)(K)}$.

الجزء الكيلوجرامى (kg mol) من مادة هو كمية من المادة كتلتها بالكيلوجرامات تساوى عدديا الكتلة الذرية أو الجزيئية (أو الوزن الذرى أو الجزيئى) . وعموما ، يعرف الجزء الكيلوجرامى بأنه كتلة المادة (بالكيلوجرام) التى تحتوى على عدد قدره 6.02×10^{26} من جسيمات المادة . العدد 6.02×10^{26} يسمى عدد أفوجادرو ويرمز له بالرمز N_A . يستخدم الناس عادة الجزء الجرامى (أو مجرد جزئى (مول)) وهو يساوى $\frac{1}{1000} \text{ kg mol}$.

يمكن استخدام النظرية الحركية للغازات وقانون الغاز المثالي معا لإثبات أن درجة الحرارة المطلقة (درجة كلفن) مقياس لطاقة الحركة الانتقالية لجزيئات الغاز . وبالتحديد $T = (2N_A/3R)(\frac{1}{2}m_0v^2)$ ، حيث $\frac{1}{2}m_0v^2$ متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزئى الغاز . يستعاض عادة عن النسبة R/N_A بثابت بولتزمان k . إذن $\frac{1}{2}m_0v^2 = \frac{3}{2}kT$. متوسط سرعة جزئى النتروجين فى الهواء حوالى 500 m/s ، ولكن للجزيئات توزيع عريض للسرعات عند أى لحظة .

يتصرف الغاز كغاز مثالي إذا تحقق شرطان أساسيان . يجب أن يكون الغاز بعيدا عن شروط إسالته . الحجم الفعلى للجزيئات يجب أن يكون صغيرا بالمقارنة بالحجم المتاح للغاز .

يستخدم قانون الغاز المثالي لتعريف مقياس كلفن لدرجات الحرارة . عند تحقيق ذلك تعتبر النقطة الثلاثية للماء 273.16 K .

تتحرك دقائق الدخان والغبار والجسيمات الغروانية حركة متعرجة تسمى الحركة البروانية . تتبع هذه الجسيمات والدقائق قانون الغاز المثالي إذا كانت مخففة بدرجة كافية . متوسط طاقة الحركة الانتقالية لكل جسيم $\frac{3}{2}kT$.

ينص قانون دالتون للضغط الجزئى على أن ضغط مخلوط من غازات مثالية يساوى مجموعة الضغوط التى يسببها كل من هذه الغازات على حدة .

يمكن أن يعزى ضغط معين لجزيئات المذاب فى المحلول لما يسمى الضغط الأوزموزى π . إذا كان المحلول مخففا بدرجة كافية فإن غاز المذاب يتبع قانون الغاز المثالي . يعطى الضغط الأوزموزى π فى هذه الحالة بالعلاقة $\pi = cRT/M$ حيث c تركيز المذاب ، M كتلته الجزيئية . هذه الحقيقة هى أساس قياس الكتل الجزيئية باستخدام الأوزمومتر .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

- ١ - تعريف المقاييس الثلاثة الشائعة لدرجات الحرارة وتحديد موضع النقط الآتية على كل منها : الصفر المطلق ، نقطة الثلج ، درجة غليان الماء .
- ٢ - تحويل درجة الحرارة من مقياس معين الى المقاييس الشائعين الآخرين .
- ٣ - رسم العلاقة البيانية التى توضح تغير كل من P و V مع درجة الحرارة فى حالة الغاز المثالي . تحديد موضع الصفر المطلق على كل رسم بياني .
- ٤ - كتابة قانون الغاز المثالي وتعريف كل كمية فيه . إيجاد P أو V أو n أو T للغاز المثالي عندما تكون جميع هذه الكميات معلومة عدا كمية واحدة .
- ٥ - تعريف الجزء الكيلوجرامى والجزئى الجرامى . شرح العلاقة بين الجزء الكيلوجرامى وعدد أفوجادرو . كتابة قيمة عدد أفوجادرو .
- ٦ - استخدام عدد أفوجادرو لإيجاد كتلة الجزئى (أو الذرة) عندما تكون الكتلة الجزيئية (أو الوزن الجزيئى) معلوما .
- ٧ - ذكر الشروط اللازمة لكى يتصرف غاز معين كغاز مثالي .

- ٨ - شرح المعنى الجزيئى لدرجة الحرارة المطلقة على أساس طاقة حركة جزيئات الغاز المثالى .
- ٩ - حساب متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزيئات غاز مثالى عندما تكون درجة حرارة الغاز معلومة . تخطيط رسم بياني يوضح توزيع سرعات جزيئات الغاز عند درجتى حرارة مختلفتين .
- ١٠ - حل المسائل المتعلقة بقانون الغاز التى تشبه الأمثلة التوضيحية من ١٠ - ٦ إلى ١٠ - ١٠ . التفرقة بين ضغط المقياس والضغط المطلق .
- ١١ - شرح ماذا تعنى الحركة البروانية ولماذا تحدث .
- ١٢ - ذكر قانون دالتون للضغوط الجزئية ، واستخدامه لإيجاد الضغط المحصل لخليط من الغازات المثالية المختلفة .
- ١٣ - وصف الأوزمومتر وتوضيح ماذا يعنى بالضغط الأوزموزى عند وصفه . شرح كيف يمكن استخدام الضغط الأوزموزى لتحديد الكتلة الجزيئية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

مقاييس سلسيوس وكلفن وفهرنهايت لدرجات الحرارة

غاز مثالى

جزء جرامى (مول) وكليوجرام وجرام

عدد أفوجادرو N_A

$$PV = nRT$$

ضغط المقياس مقابل الضغط المطلق

$$\frac{3}{2}kT = \text{طاقة الحركة الانتقالية}$$

النظرية الحركية للغازات

الحركة البروانية

الضغط الأوزموزى

اسئلة وتخمينات

- ١ - افترض أنك كنت الشخص الوحيد الباقى على قيد الحياة بعد حادث تحطم طائرة فى جزيرة صغيرة فى جنوب المحيط الهادى . وأثناء انتظارك للنجدة قررت بناء ترمومتر . كيف يمكنك تحقيق ذلك ؟
- ٢ - ارسم رسما بيانيا يوضح تغير ضغط غاز مثالى كدالة من $1/V$ عندما يضغط الغاز ببطء عند درجة حرارة ثابتة .
- ٣ - يمكننا أن نتصور جزيئات الغاز المثالى كما لو كانت كرات دقيقة فى حركة دائمة . كذلك فإن الجسيمات الغروانية تسلك سلوك الغاز المثالى . ولكن الحزب الزجاجى وكرات حمام السباحة لا تتصرف كغاز مثالى . أين يقع الخط الفاصل (فى الحجم) وإلى أى شىء يعزى ؟
- ٤ - حبس غازى الأيدروجين والأكسجين عند الضغط الجوى فى وعاء زجاجى قوى جدا يحتوى على قطبين كهربائيين . أطلقت شرارة بين القطبين الكهربائيين فسببت اشتعال الغازين بحيث تفاعلا حسب المعادلة $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$. هل سيتغير الضغط فى الأنبوبة بعد أن تعود درجة الحرارة مرة ثانية إلى قيمتها الأصلية ($200^\circ C$) ؟ اشرح . ماذا يحدث إذا كانت درجة الحرارة النهائية $20^\circ C$ ؟
- ٥ - عند اشتقاق قانون الغاز افترضنا أن تصادمات جزيئات الغاز بالجدار تامة المرونة ، وهذا ليس فرضا صحيحا . ومع ذلك فإن هذا لا يغير من الأمر شيئا طالما كانت درجة حرارة الجدران هى نفس درجة حرارة الغاز . اشرح لماذا .
- ٦ - قارن طلقة الوضع الثقالية لجزء نثروجين يوجد على ارتفاع قدره 1 m فوق سطح الأرض بطاقة حركته عندما تكون درجة الحرارة (أ) $0^\circ C$ ، (ب) $-270^\circ C$.

- ٧ - بالرغم من أن الهواء يتكون أساساً من جزيئات النتروجين N_2 ، إلا أنه يحتوي على بعض الأكسجين O_2 بالطبع . هل يتحرك هذان النوعان من الجزيئات بنفس متوسط السرعة ؟ ماهى العلاقة المضبوطة بين سرعتين ؟
- ٨ - علل لماذا تكون جزيئات الماء سائلاً تحت الشروط العادية بالرغم من أن غازى الأيدروجين H_2 والأكسجين O_2 لا تتكثف إلا بعد الوصول إلى درجات حرارة منخفضة جداً .
- ٩ - يتغير تركيب الجو عند الوصول إلى ارتفاعات كبيرة فوق الأرض . لماذا يجب أن تكون نسبة النتروجين N_2 أكبر عند الارتفاعات العالية منها عند الارتفاعات المنخفضة بالمقارنة بمحتوى الأكسجين O_2 ؟
- ١٠ - يحتوى كل سنتيمتر مكعب من الفضاء الخارجى على حوالى جزيء واحد . حاول أن تستنبط طريقة لقياس ضغط مثل هذا الغاز المخلخل .
- ١١ - باستخدام الشكل ١٠ - ٥ قدر نسبة جزيئات النتروجين التى تزيد سرعتها عن 1250 m/s عند درجتى 460 K و 1700 K .
- ١٢ - قدر حجم بالون مملوء بالهليوم يستطيع أن يرفع كتلة قدرها 500 kg . افترض كبداية على الأقل أن كتلة البالون داخله فى الكتلة 500 kg . (ق)

مسائل

اعتبر أن الضغط الجوى $1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ($= 14.7 \text{ lb/in}^2 = 76 \text{ cmHg} = 1 \text{ atm}$)

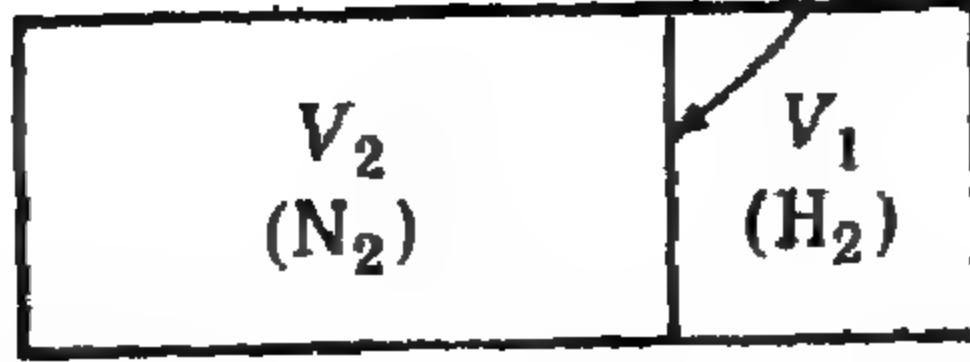
- ١ - ماهما قراءتا ترمومترى سلسيوس وكلفن إذا كانت درجة الحرارة : (أ) 77°F (ب) -13°F ؟
- ٢ - درجة حرارة الجسم العادية 98.6°F . ماقيمة هذه الدرجة على مقياس سلسيوس ، وماقيمتها على مقياس كلفن ؟
- ٣ - طبقاً لدليل الثوابت الفيزيائية ، درجة تجمد الزئبق -38.9°C ودرجة غليانه 357°C . حول هاتين الدرجتين إلى درجتى فهرنهايت .
- ٤ - أغلقت أنبوبة اختبار عند STP* . ثم سخنت إلى درجة 300°C . ماقيمة الضغط فى هذه الحالة داخل الأنبوبة بالضغط الجوى والنيوتن لكل متر مربع والسنتيمتر من الزئبق والباوند لكل بوصة مربعة ؟
- ٥ - خزان مغلق حجمه 30 ft^3 متصل بمقياس ضغط قراءته 100 lb/in^2 . رفعت درجة حرارة الخزان بعد ذلك من 27°C إلى درجة أعلى مجهولة . (أ) ماهى درجة الحرارة الجديدة إذا كانت قراءة المقياس 140 lb/in^2 ؟ (ب) ماقيمة الضغط النهائى فى الخزان بالضغط الجوى ؟
- ٦ - خزان حجمه $20,000 \text{ cm}^3$ به أكسجين مضغوط عند ضغط مقياس قدره 1500 lb/in^2 . ماهو الحجم الذى يشغله هذا الغاز عند الضغط الجوى ونفس درجة الحرارة ؟
- ٧ - ضغط الهواء الموجود فى غرفة عند درجة 27°C والضغط الجوى فجأة إلى حجم قدره $1/20$ من حجمه الأسمى وضغط قدره 30 atm . ماهى درجة حرارة الغاز ؟
- ٨ - تمدد غاز ضغطه المطلق 1000 lb/in^2 ودرجة حرارته 27°C فجأة فى غرفة حجمها 10 أضعاف الحجم الأسمى . ماقيمة الضغط الجديد للغاز بعد دقائق قليلة إذا وجد أن درجة حرارته 3°C فى تلك اللحظة ؟
- ٩* - فقاعة هوائية حجمها 0.23 cm^3 موجودة على قاع بحيرة عمقها 30 ft . أوجد حجمها قبل أن تصل إلى السطح مباشرة . افترض أن درجة الحرارة عند القاع 7°C وعند السطح 17°C .
- ١٠ - الوزن الجزيئى لجزيء البولى ايثيلين فى قطعة من البولى ايثيلين هو حوالى 25,000 . أوجد كتلة هذا الجزيء . البولى ايثيلين قريبة من 0.95 g/cm^3 . ماعدد هذه الجزيئات الموجودة فى (أ) 1 g من البولى ايثيلين (ب) 1 cm^3 من البولى ايثيلين
- ١١ - كثافة البنزين 879 kg/m^3 ووزنه الجزيئى 78 . أوجد (أ) كتلة جزيء البنزين ، (ب) عدد جزيئات البنزين فى 1 cm^3 .

* هى الحروف الأولى من العبارة «Standard temperature and pressure»

أى درجة الحرارة والضغط العيارين ، وهما 0°C ، 1 atm .

- ١٢ - خزان حجمه 2000 cm^3 مملوء بغاز النتروجين عند ضغط مقياس قدره 100 atm . (أ) ماعدد الجزيئات الكيلوجرامية من النتروجين الموجودة في الخزان ؟ (ب) ماعدد الكيلوجرامات من النتروجين الموجودة في الخزان ؟ اعتبر أن درجة الحرارة 20°C وأن الوزن الجزيئي للنتروجين N_2 هو 28 .
- ١٣ - يعتبر الضغط $1 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ تفريفا جيدا في كثير من التطبيقات . (أ) اوجد عدد الجزيئات الكيلوجرامية من النتروجين في 1 cm^3 عند هذا الضغط . (ب) ماعدد جزيئات النتروجين الموجودة في 1 cm^3 عند هذا الضغط ؟ افترض أن الهواء نتروجين نقي عند درجة حرارة الغرفة (في الحقيقة يمثل النتروجين حوالي 78% من الهواء) .
- ١٤ - الحجم الفعلي لجزيء النتروجين هو حوالي $8 \times 10^{-30} \text{ m}^3$. اوجد كسر الحجم الذي تحتله جزيئات غاز النتروجين بالفعل عند STP .
- ١٥ - وضعت قطعة من الثلج الجاف ، CO_2 ، في أنبوبة اختبار ثم أغلقت ، فإذا كان وزن الثلج الجاف 0.48 g . وحجم أنبوبة الاختبار المغلقة 20 cm^3 ، ماهو الضغط النهائي في الأنبوبة إذا تبخر الثلج الجاف تماما ووصل إلى حالة التوازن الحراري مع الجو المحيط عند درجة 27°C ؟ (الوزن الجزيئي للثلج الجاف CO_2 هو 44) .
- ١٦ - عندما أغلقت أنبوبة اختبار حجمها 20 cm^3 بإحكام عند درجة حرارة منخفضة جدا ، تكثفت بعض قطرات النتروجين السائل في الأنبوبة من الهواء (درجة غليان النتروجين -210°C) . ماذا يكون ضغط النتروجين في الأنبوبة عندما تسخن الأنبوبة إلى درجة 27°C إذا كان « وزن » القطرات 0.14 g ؟
- ١٧ - يراد حرق الأندروجين في الأكسجين للحصول على 18.0 g من الماء . ما حجم الأندروجين اللازم لذلك عند STP ؟ (الوزن الجزيئي للماء H_2O هو $2+16=18$) .
- ١٨ - أسطوانة مغلقة تحتوي على كباس متحرك معزول يقسم الأسطوانة إلى جزئين . إذا وضعت كتلتان متساويتان من نفس الغاز في كل من جانبي الأسطوانة ، اثبت أن الكباس يتخذ موضعا محددًا بحيث $V_2 = V_1(T_2/T_1)$ ، حيث V_1 و T_1 هما الحجم ودرجة الحرارة على أحد جانبي الكباس و V_2 و T_2 هما الحجم ودرجة الحرارة على الجانب الآخر من الكباس .
- ١٩* - الفضاء الخارجي يتكون أساسا من ذرات ايدروجين منفردة ودرجة حرارته حوالي 3 k . وفي المتوسط هناك واحد من هذه الذرات في كل سنتيمتر مكعب . (أ) اوجد ضغط هذا الغاز في الفضاء الخارجي ، وعبر عن إجابتك بالضغط الجوي . (ب) اوجد متوسط طاقة حركة واحدة من ذرات الأيدروجين . (ج) ماهي سرعة ذرة بهذه الطاقة ؟ (الوزن الذري لذرة الأيدروجين 1) .
- ٢٠ - درجة الحرارة داخل الشمس تساوي تقريبا درجة حرارة القنبلة الذرية ، أي حوالي 10^8 K . اوجد متوسط طاقة الحركة الانتقالية للبروتون (نواة الأيدروجين) عند هذه الدرجة واحسب منها متوسط سرعته (الكتلة الذرية لذرة الأيدروجين 1 ، وتقريب جيد يمكن اعتبار أن الكتلة الذرية للبروتون هي أيضا 1) .
- ٢١ - كثافة الهواء الجاف عند STP هي 1.29 kg/m^3 ، وتركيبه (الوزني) كالآتي : 78% نتروجين N_2 ، 21% أكسجين O_2 ، 0.9% أرجون زائد آثار من ثاني أكسيد الكربون CO_2 والهليوم والغازات الأخرى . (أ) اوجد ضغط كل من المركبات الثلاث الرئيسية باستخدام قانون الغاز . (ب) استخدام قانون دالتون لإيجاد ضغط الهواء عند STP . (الوزن الجزيئي لغاز الأرجون 40 وهو يساوي الكتلة الذرية لأن الغاز أحادي الذرة) .
- ٢٢ - اوجد الضغط الأوزموزي لمحلول مائي من السكر تركيزه 2 g لكل 100 cm^3 . الوزن الجزيئي للسكر 342 . افترض أن درجة الحرارة 27°C . عبر عن إجابتك بالسنتيمترات من الماء .
- ٢٣ - حضر محلول بإذابة 0.250 g من البولستين في البنزين للحصول على 100 cm^3 من المحلول . قيس الضغط الأوزموزي للمحلول عند 20°C فوجد أنه يساوي 1.67 cm من البنزين . اوجد الوزن الجزيئي للبولستين . (كثافة البنزين عند درجة 20°C تساوي 879 kg/m^3) .

لوح من
البلاستيك



شكل ١٠م - ١

*٢٤ - يفصل لوح رقيق من البلاستيك بين وعاءين كما هو مبين في الشكل م ١٠ - ١ . ويحتوى الحجم 1 على غاز الأيدروجين H_2 عند STP ، بينما يحتوى V_2 على غاز النتروجين N_2 عند STP . معلوم أيضا أن $V_2 = 2V_1$. ثقب الآن ثقب في البلاستيك . ماهو الضغط النهائي بعد الوصول إلى حالة التوازن ؟ كرر العمل اذا كان ضغط غاز الأيدروجين H_2 هو 240 cmHg وضغط غاز النتروجين هو 60 cmHg .

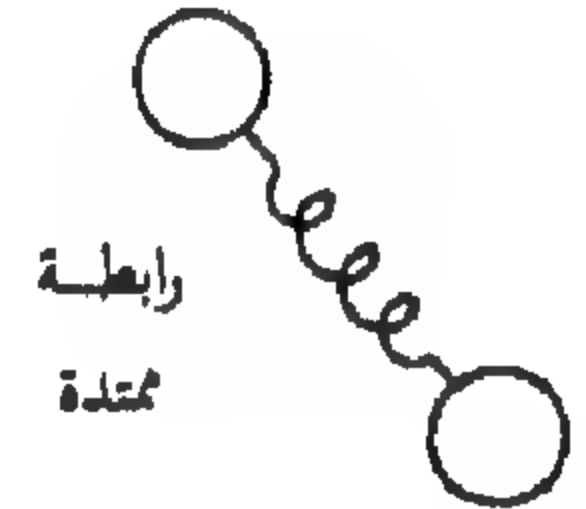
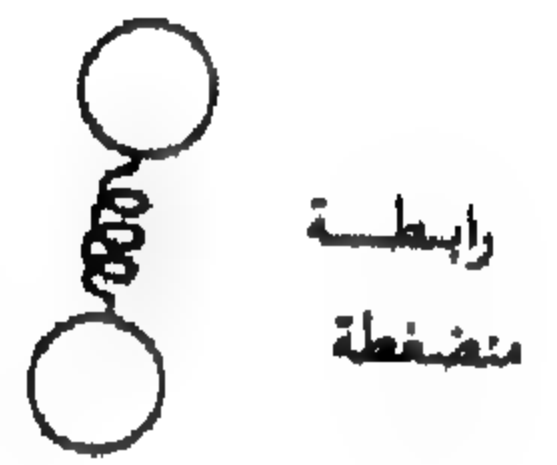
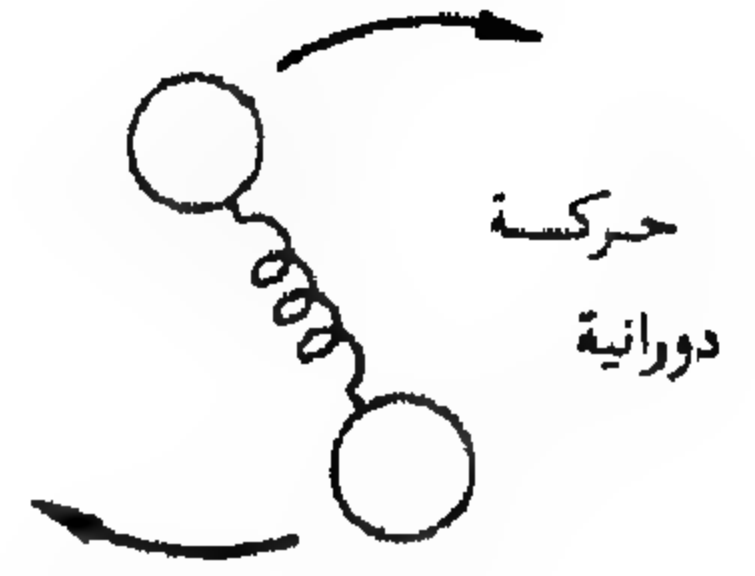
الفصل الحادى عشر

الخواص الحرارية للمادة

عندما تبرد المادة فإنها تفقد طاقة حرارية . ماهى الكيفية التى تترك بها الطاقة الحرارية المادة ؟ ماتأثير فقد الطاقة الحرارية على ذرات المادة ؟ ماهى كمية الطاقة الحرارية التى تفقدها ؟ سنناقش إجابات هذه الاسئلة فى هذا الفصل . بالإضافة إلى ذلك فإننا سنتعرض بالدراسة لبعض المواضيع الأخرى كغليان وتجمد السوائل وطرق انتقال الحرارة . وسوف تساعدنا المعلومات التى سوف نكتسبها من دراسة هذه الموضوعات على تعميق فهمنا لطبيعة الحرارة وكذلك سلوك الذرات والجزيئات فى المادة .

١١ - ١ الطاقة الحرارية والطاقة الداخلية

رأينا في الفصل السابق أن درجة الحرارة المطلقة لغاز مثالي لها معنى سهل الفهم : فمتوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزء الغاز هو $\frac{3}{2}kT$ ، حيث k ثابت بولتزمان . نستنتج من ذلك أن متوسط طاقة حركة جزء في غاز ساخن أكبر منها في الغاز البارد . ومع ذلك فإن معظم أنواع جزيئات الغاز لها طاقة أخرى بالإضافة إلى طاقة الحركة الانتقالية . فالجزء ثنائي الذرة ، مثلا ، كجزء النتروجين N_2 أو الأكسجين O_2 له طاقة حركة دورانية بالإضافة إلى طاقة الحركة الانتقالية . ويمثل الشكل (١١ - ١) رسما تخطيطيا لأحد هذه الجزيئات . وفي كثير من الأحيان يعتبر الجزء مكونا من كرتين متصلتين بواسطة زنبرك . وعادة يتشوه هذا الزنبرك - الذي يمثل الرابطة الكيميائية بين الذرتين - عندما تتصادم الجزيئات بعضها ببعض . نتيجة لذلك قد ينضغط الزنبرك أو يمتد ، وفي كلتا الحالتين تخزن الطاقة في الزنبرك المشوه الموجود بين الذرتين اللتين تكونان الجزء . نرى من ذلك أنه حتى الجزء البسيط ثنائي الذرة يخزن طاقة كبيرة بالإضافة إلى طاقة حركته الانتقالية .



ويصبح الموقف أكثر صعوبة عندما تنتقل إلى الجزيئات ذات التركيب الأكثر تعقيدا . ذلك لأن كل جزء يحتوي على عديد من الروابط الزنبركية . وعليه فإن الجزيئات تستطيع أن تخزن كمية أكبر من الطاقة في روابطها المشوهة . وتنطبق النظرية الحركية على الغاز المثالي المكون من مثل هذه الجزيئات المعقدة أيضا . وهكذا فإن طاقة الحركة الانتقالية لهذه الجزيئات تعطى كذلك بالكمية $\frac{3}{2}kT$ ، ولكن كل جزء يملك طاقة كبيرة بالإضافة إلى ذلك .

شكل (١١ - ١)

لجزء الغاز طاقة دورانية بالإضافة إلى طاقة الحركة الانتقالية ، وله أيضا طاقة مرتبطة بالرابطة الزنبركية بين ذراته .

عند تصادم جزيئات الغاز بعضها ببعض توزع طاقة الغاز بين طاقة الحركة الانتقالية وطاقة الحركة الدورانية والطاقة المرتبطة « بالزنبركات » بين الذرات . ونحن نعلم أن طاقة الحركة الانتقالية تتناسب مع درجة الحرارة المطلقة للغاز T . وأيضا تزداد الطاقة الدورانية والطاقة الاهتزازية (المرتبطة بالزنبركات) بزيادة T . أي أن T مقياس للطاقة الكلية لجزيئات الغاز . وفي الحقيقة فإن مقررات الميكانيكا الإحصائية تثبت أن الطاقة الكلية تتناسب مع T بشرط ألا تكون درجة الحرارة منخفضة جدا* .

* هذا الشرط ، وهو أن درجة الحرارة لا يجب أن تكون منخفضة جدا ، له معنى عميق . وفي الحقيقة يمثل فشل النظرية الحركية في تفسير سلوك الغازات عند درجات الحرارة المنخفضة لغزا عويضا للفيزيائيين ؛ وقد ظلت أسباب هذه التناقضات مجهولة إلى أن أمكن تفسيرها على أساس مبادئ ميكانيكا الكم . وسوف نبحث ذلك بتوسع في الفصل السادس والعشرين .

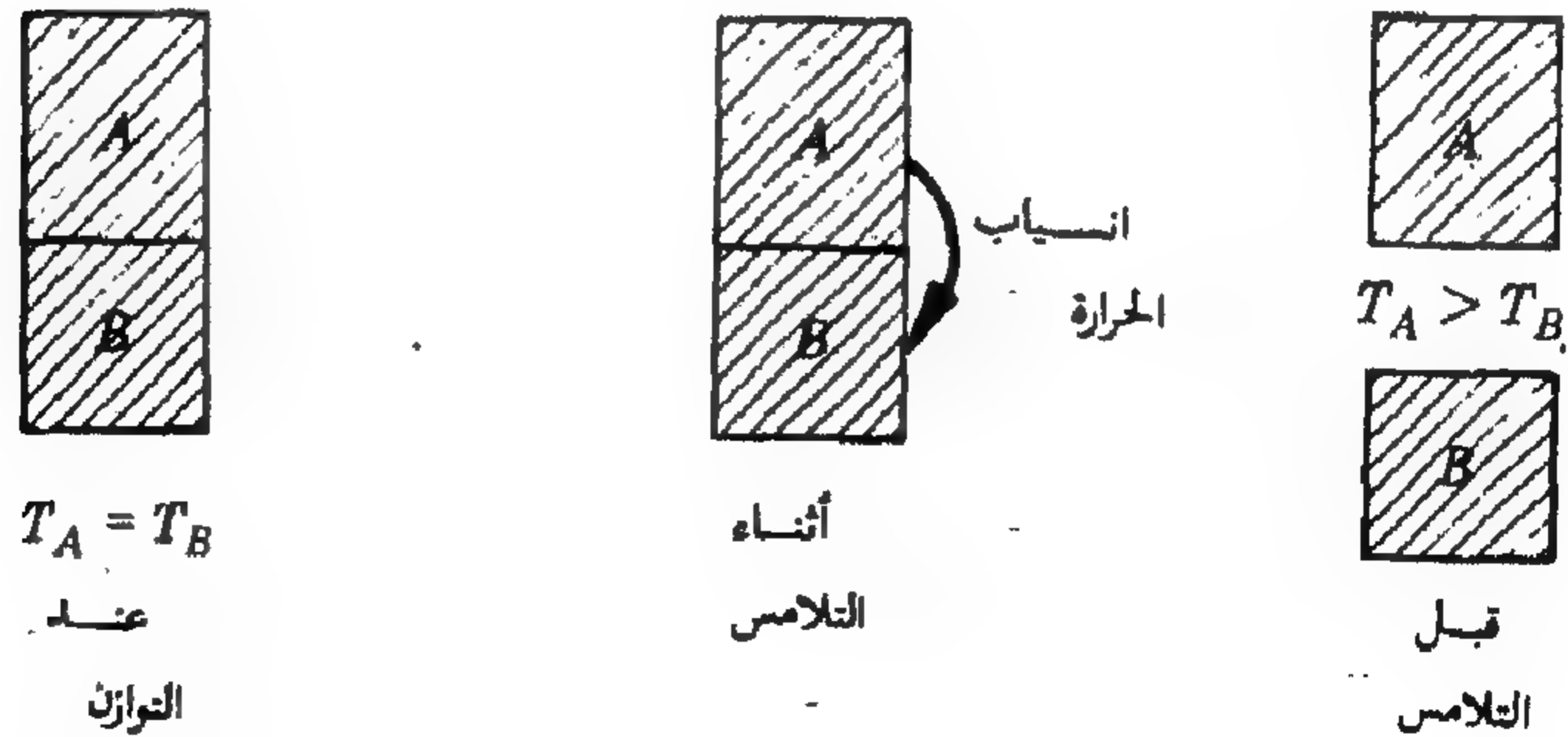
وتنطبق نفس الأفكار على السوائل والجوامد . فالسائل يشبه كثيرا الغاز المضغوط جدا . وبالرغم من أن الجزيئات متقاربة جدا من بعضها البعض بحيث لا يمكنها أن تتصرف كغاز مثالي ، فلا زال صحيحا أن T مقياس للطاقة الجزيئية للسائل . كذلك يمكن اعتبار قطعة من المادة الصلبة كجزيء معقد جدا . وبالرغم من أن تعقيد هذا « الجزيء » كبيرا جدا ، فلا زالت هناك طاقة مرتبطة بالروابط الزنبركية بين ذراته . وهذه الطاقة تزداد أيضا بزيادة درجة الحرارة .

وكما نرى فإن الطاقة المرتبطة بالحركة العشوائية للجزيئات والذرات تزداد مع T في جميع صور المادة . وتسمى هذه الطاقة المرتبطة بالحركة العشوائية للذرات والجزيئات عادة الطاقة الحرارية .

تعريف تعرف الطاقة الداخلية U لمادة كإلى : مجموع جميع أنواع الطاقة التي تملكها الذرات أو الجسيمات الأخرى المكونة للمادة يسمى الطاقة الداخلية للمادة . وكما نرى فإن الطاقة الداخلية U تتضمن طاقتي الحركة والوضع والطاقة الكيميائية والكهربائية والنووية وجميع الصور الأخرى من الطاقة التي تملكها جزيئات المادة .

لتعريف الكمية المسماة بالطاقة الحرارية يجب أولا أن ندرس ما يحدث عند تلامس مادتين مختلفتين في درجة الحرارة ، ويمثل الشكل (١١ - ٢) هذا الموقف . إذا كانت درجة حرارة الجسم A أعلى من درجة حرارة الجسم B ، وإذا كان الجسمان مكونين من نفس المادة ، فإن متوسط طاقة الجزيء الواحد في A ستكون أكبر من متوسط طاقة الجزيء الواحد في B . نتيجة لذلك ، عند وضع الجسمين في حالة تلامس تفقد الجزيئات في A كمية من الطاقة تكتسبها الجزيئات في B . ولذلك فإن A يبرد و B يسخن .

شكل (١١ - ٢)
تساب الطاقة الحرارية من
الجسم الساخن إلى الجسم
الأبرد حتى تصبح درجتا
حرارتهما متساويتين .



تعريف الطاقة التي تنتقل من جسم ذي درجة حرارة عالية إلى جسم ذي درجة حرارة منخفضة نتيجة لفرق درجتى الحرارة تسمى الطاقة الحرارية ، وتمثل

بالرمز ΔQ . وتبين التجربة العملية أن انسياب الطاقة الحرارية يتوقف عندما تصبح درجتا حرارة الجسمين متساويتين . وهذا صحيح حتى إذا كان الجسمان مصنوعين من مادتين مختلفتين . ويستنتج من ذلك أن :

الطاقة الحرارية تنساب تلقائيا من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الأبرد وليس العكس .

في الجزء التالى سنعرف الوحدات العملية التى تقاس بها الطاقة الحرارية .

١١ - ٢ وحدات الطاقة الحرارية :

ثبت تاريخيا أن استخدام الطاقة الحرارية قد سبق فهمنا لطبيعة الحرارة بزمان بعيد . بناء على ذلك كانت الحرارة تقاس بطريقة عملية بحتة ، وقد اختيرت وحداتها نظرا لفائدتها . وحيث أن الماء يدخل فى معظم استخدامات الإنسان للحرارة ، فليس من الغريب أن تختار كمية الحرارة ووحداتها بدلالة تجربة مرتبطة بالماء .

الوحدتان الشائعتان لكمية الحرارة هما السعر (cal) والوحدة الحرارية البريطانية (Btu) ، وتعرفان اليوم كمايلى :

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

و :

$$1 \text{ Btu} = 1054 \text{ J}$$

ويتفق هذان التعريفان مع التعريفين الأصليين لهاتين الوحدتين ، وهما كاللتالى : السعر هو كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء من 14.5°C إلى 15.5°C ، و Btu هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة باوند واحد من الماء من 63°F إلى 64°F . من أى من هذين التعريفين نجد أن :

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal}$$

ويستخدم المتخصصون فى التغذية وحدة أخرى للطاقة الحرارية ، وهى تسمى أيضا السعر ، ولكن من الأنسب أن يسمى الكيلوكالورى (أو السعر الكبير) لأن

$$1 \text{ nutritionist's calorie} = 1000 \text{ cal}$$

فمثلا ، عندما يخبرنا عالم الصحة أن وجبتنا اليومية يجب أن تحتوى على حوالى 2000 cal من طاقة الطعام فإنه يعنى 2000 kcal .

١١ - ٣ السعة الحرارية النوعية :

لكي نرفع درجة حرارة جسم ما يجب أن نزيد الطاقة الحرارية لجزيئاته .
ويمكننا تحقيق ذلك بالسماح للحرارة بالانتقال إلى الجسم من جسم آخر أكثر سخونة . بالمثل ، إذا أردنا تبريد جسم يمكننا تحقيق ذلك بالسماح للطاقة الحرارية بالانسياب من هذا الجسم إلى جسم آخر أبرد . ولكي نستطيع وصف تلك العمليات يجب أن نعلم كمية الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة الجسم . كمية الحرارة التي يجب أن تنساب إلى أو من وحدة الكتل من المادة لتغير درجة حرارته بمقدار درجة واحدة تسمى السعة الحرارية النوعية للمادة .

تعريف

يرمز للسعة الحرارية النوعية بالرمز c ، ويمكن كتابة تعريفه في صورة معادلة .
عندما تنساب كمية من الحرارة ΔQ إلى كتلة من المادة قدرها m فإن درجة حرارتها سوف تزداد بمقدار ΔT . إذن ، من التعريف :

السعة
الحرارية
النوعية

$$\frac{\Delta Q}{m \Delta T} = c = \text{السعة الحرارية النوعية}$$

ومنه نجد أن :

$$\Delta Q = cm \Delta T \quad (١١ - ١)$$

وحدات c هي السعر لكل جرام لكل درجة سلسيوس . ويستخدم تعريف مشابه للكمية c في النظام البريطاني للوحدات ، ولكن في هذه الحالة يؤخذ 1 lb من المادة ويقاس تغير درجة الحرارة بالدرجات الفهرنيتية . ووحدة c في النظام البريطاني هي و . ح . ب (Btu) لكل باوند لكل درجة فهرنيتية .

ونظرا لاختلاف تركيب المواد فإن كل مادة لها سعة حرارية نوعية معينة . بالإضافة إلى ذلك فإن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة المادة درجة واحدة ، تتغير قليلا مع درجة الحرارة . عادة يكون هذا التغير طفيفا في مدى محدود من درجات الحرارة ، ولذلك فانه يهمل عادة . ويمثل الجدولان (١١ - ١) و (١١ - ٢) قيم c لكثير من المواد . لاحظ أن القيم المعطاه تنطبق على كل من الوحدات سعر لكل جرام لكل درجة سلسيوس و و . ح . ب لكل باوند لكل درجة فهرنيتية . هل يمكنك أن تثبت لماذا يجب أن تكون القيمتان متساويتين باستخدام تعريف c ؟

مثال توضيحي ١١ - ١ : ماهي كمية الحرارة المنطلقة عندما يبرد 20 g من الماء من درجة 90°C إلى 30°C ؟

طريقة الحل : السعة الحرارية النوعية للماء هي $1.00 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}$. في هذه الحالة $\Delta T = -60^\circ\text{C}$ ، إذن ، من المعادلة (١١ - ١) نجد أن :

$$\Delta Q = cm \Delta T = [1.00 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}](20 \text{ g})(-60^\circ\text{C}) = -1200 \text{ cal}$$

وتبين لنا الإشارة السالبة أن هذه الكمية من الحرارة مفقودة .

جدول (١١ - ١)

السعة الحرارية النوعية لبعض المواد مقاسة بالوحدات $\text{cal/(g)(}^\circ\text{C)}$ أو $\text{Btu/(lb)(}^\circ\text{F)}$.

الماء	1.000	النيوم	0.21
الجسم الأدمى	0.83	زجاج	0.1-0.2
كحول ايثيل (ايثانول)	0.55	حديد	0.11
بارافين	0.51	نحاس	0.093
ثلج	0.50	زئبق	0.033
بخار الماء	0.46	رصاص	0.031

جدول (١١ - ٢)

السعة الحرارية النوعية لبعض الغازات عند درجة 15°C مقاسة بالوحدات $\text{cal/(g)(}^\circ\text{C)}$ أو $\text{Btu/(lb)(}^\circ\text{F)}$

الغاز	c_v	c_p	$\gamma = c_p/c_v$
He	0.75	1.25	1.66
Ar	0.075	0.125	1.67
O ₂	0.155	0.218	1.40
N ₂	0.177	0.248	1.40
CO ₂	0.153	0.199	1.30
H ₂ O (200°C)	0.359	0.471	1.31
CH ₄	0.405	0.53	1.31

مثال توضيحي ١١ - ٢ : يحتوى إبريق ترموس على 300 g من القهوة (ماء أساسا) عند درجة 90°C . صب في هذا الإبريق 50 g من اللبن (ماء أساسا أيضا) عند درجة حرارة 15°C . ماهي درجة الحرارة النهائية للقهوة ؟

طريقة الحل : إبريق الترموس معزول جيدا ، ولذلك فإننا سوف نفترض عدم تسرب أى حرارة من القهوة إليه . وعليه فإن الحرارة التى تفقدها القهوة تستغل كلية في تدفئة اللبن . ويخبرنا قانون بقاء الطاقة أن :

الطاقة المكتسبة بواسطة اللبن = الطاقة المفقودة بواسطة القهوة

باستخدام المعادلة (١١ - ١) يمكننا كتابة هذه المعادلة كالتالى :

$$(cm|\Delta T|)_{\text{coffee}} = (cm|\Delta T|)_{\text{milk}}$$

في هذه الحالة $c = 1.00 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}$ ، وكتلة القهوة 300 g وكتلة اللبن 50 g . فإذا رمزنا لدرجة الحرارة النهائية لمحلول القهوة والماء بالرمز t فإن ΔT ستكون $t - 90^\circ\text{C}$ للقهوة بينما ستكون $15^\circ\text{C} - t$ للبن . لاحظ أننا نريد أن تكون ΔT عددا موجبا ، لذلك فإننا كتبناها $t - 90^\circ\text{C}$ وليس $90^\circ\text{C} - t$. باستخدام هذه القيم نحصل من المعادلة السابقة على التالي :

$$t = 79.3^\circ\text{C}$$

أي أن اللبن قد برد القهوة بمقدار 10.7°C .

مثال توضيحي ١١ - ٣ : وعاء معزول من الألمنيوم « وزنه » 20 g يحتوي على 150 g من الماء عند درجة 20°C . سخنت قطعة من المعدن كتلتها 30 g إلى درجة 100°C ثم أسقطت في الماء . فإذا كانت درجة الحرارة النهائية للماء والعلبة والمعدن هي 25°C ، اوجد السعة الحرارية النوعية للمعدن .

طريقة الحل : لاحظ في هذه الحالة أن كلا الوعاء والماء يكتسبان حرارة . ولهذا فإن قانون بقاء الطاقة يسمح لنا بكتابة المعادلة الآتية :

الحرارة المفقودة بواسطة المعدن = الحرارة المكتسبة بواسطة الماء + الحرارة المكتسبة بواسطة العلبة .

وهذه الكميات هي كمايلي :

$$\text{الكسب الحرارى للعلبة} = [0.21 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}](20 \text{ g})(5^\circ\text{C})$$

$$\text{الكسب الحرارى للماء} = [1.00 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}](150 \text{ g})(5^\circ\text{C})$$

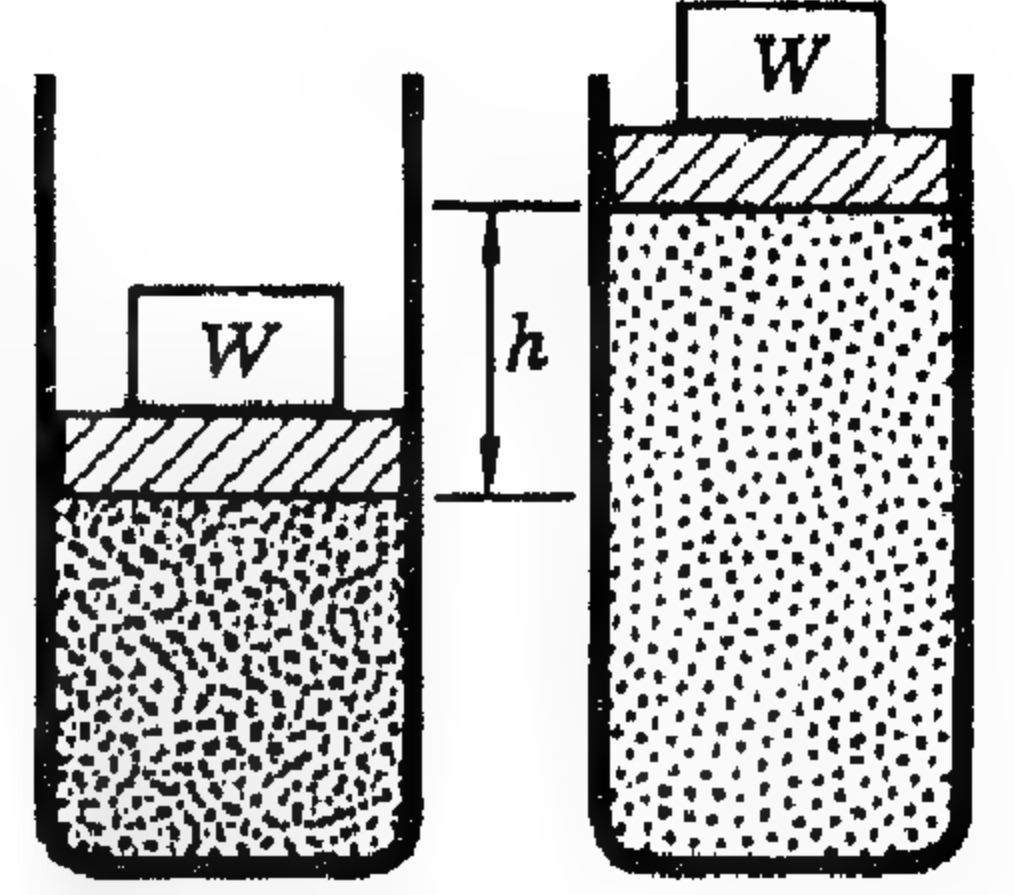
$$\text{الفقد الحرارى للمعدن} = c_x(30 \text{ g})(75^\circ\text{C})$$

بالتعويض عن هذه الكميات في المعادلة السابقة نجد أن $c_x = 0.34 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}$

١١ - ٤ c_p و c_v للغازات

سجلنا في الجدول (١١ - ٢) قيمتين للسعة الحرارية النوعية للغازات وهما c_p و c_v . وبين الدليل السفلى لهاتين الكميتين ماإذا كان ضغط الغاز أو حجمه قد ظل ثابتا أثناء القياس . وسوف تلاحظ من الجدول أن السعة الحرارية تحت حجم ثابت c_v أقل من الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت c_p . ويمكن فهم السبب في ذلك بسهولة من الاعتبارات التالية .

عند تسخين غاز في وعاء ثابت الحجم تظهر الطاقة الحرارية المضافة إلى الغاز بأكملها كطاقة إضافية لجزيئات الغاز ، أى أنها تستغل بأكملها في رفع درجة حرارة الغاز . ولكن الحال ليست كذلك إذا كان الغاز يتمدد أثناء تسخينه . ويمكننا فهم ذلك بالرجوع إلى الشكل (١١ - ٣) . يمثل هذا الشكل كمية من الغاز في وعاء مغلق من أعلى بواسطة كباس يحمل ثقلا ، ويمارس هذا الكباس ضغطا ثابتا على الغاز . فإذا أضيفت الحرارة إلى الغاز فإنه سوف يتمدد رافعا الكباس . ومع ذلك فإن ضغط الغاز ، وهو يساوى الضغط المطبق بواسطة الكباس ، يظل ثابتا أثناء تمدد الغاز . ولكن الغاز يبذل شغلا أثناء رفع الكباس ، وهذا الشغل يبذل على حساب الطاقة الحرارية التى تنساب إلى الغاز . وعليه فإن الحرارة المضافة إلى الغاز لاستغلال بأكملها في تسخين الغاز ، ولكن جزءا منها يستهلك في بذل الشغل اللازم لكى يرفع الغاز الكباس .



شكل (١١ - ٣)

عند تسخين الغاز في الغرفة يرتفع الكباس ويظل الضغط ثابتا . ومن ثم فإن الطاقة الحرارية يجب أن تبذل شغلا في رفع الكباس وكذلك في تسخين الغاز .

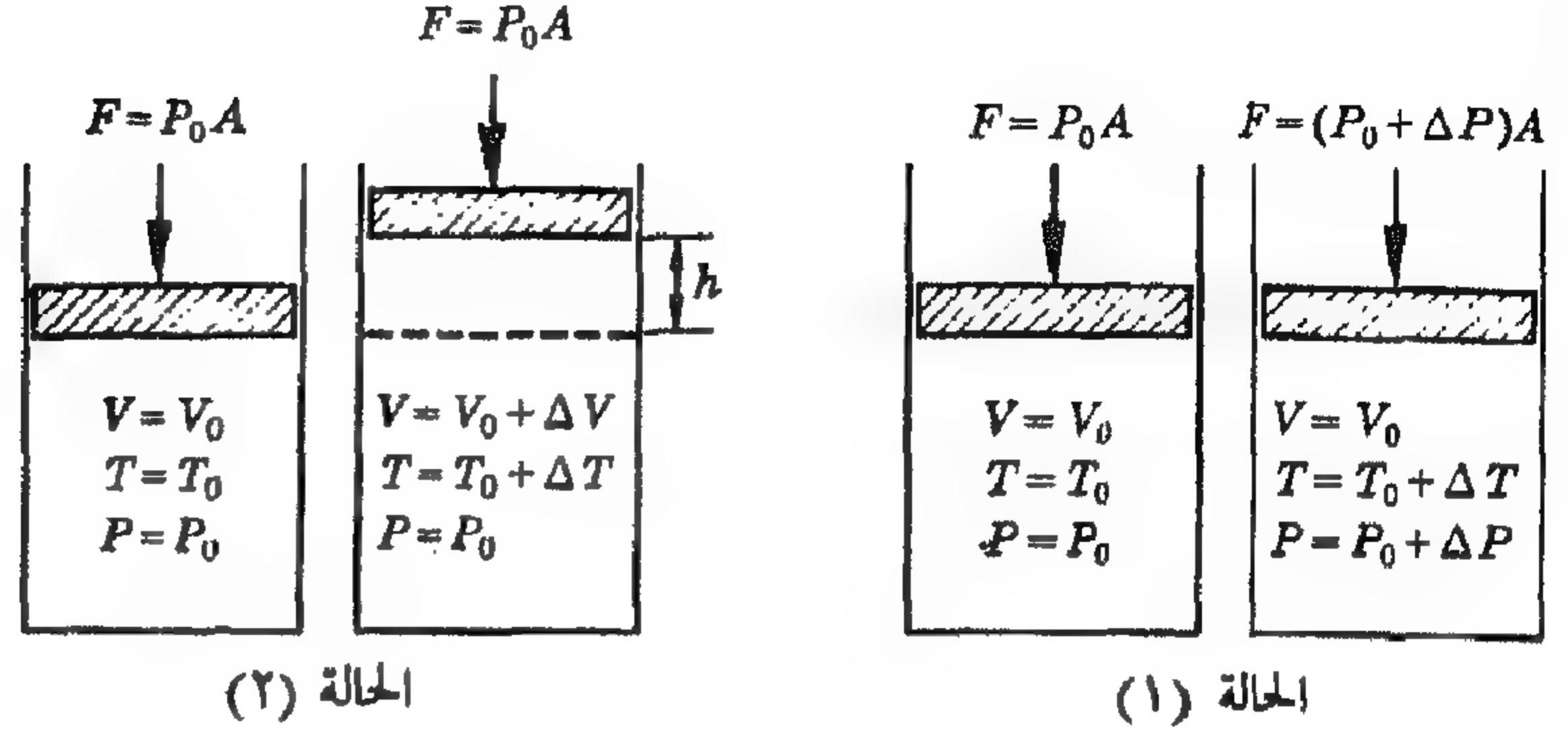
نرى من ذلك أن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز بمقدار معين تحت ضغط ثابت أكبر من كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارته بنفس المقدار تحت حجم ثابت . ففي الحالة الأولى يستغل بعض الطاقة الحرارية في بذل الشغل ، لذلك فإن c_p أصغر من c_v . والفرق بين هاتين القيمتين يساوى الشغل المبذول على الكباس عندما ترتفع درجة حرارة وحدة الكتلة من الغاز درجة واحدة تحت ضغط ثابت .

وسوف نرى من الملاحظة الخاصة المذكورة في صفحة ٢٥٤ أن قيمة $c_p - c_v$ للغاز المثالى تساوى R/M ، حيث R ثابت الغاز ، M الوزن الجزيئى للغاز

١١ - ٥ حرارة التبخير وجليان السوائل

رأينا مما سبق أن الطاقة الداخلية للمادة تزداد عند إضافة الطاقة الحرارية إلى المادة ، وتصاحب هذه الزيادة في الطاقة الداخلية عادة بزيادة في درجة الحرارة . ومع ذلك ، فإن درجة الحرارة لاتزداد دائما بالرغم من زيادة الطاقة الداخلية للمادة . فعند درجة الحرارة التى يحدث فيها تغير الطور في المادة تظل درجة الحرارة ثابتة حتى ينتهى تغير الطور تماما . فمثلا ، يحدث تغير الطور عند درجة انصهار المواد البلورية أو درجة جليان السوائل . ففي الحالة الأولى يتحول الطور البلورى إلى طور السيولة ، وفي الحالة الثانية يتحول طور السيولة إلى طور البخار . وبالرغم من أن الحرارة يجب أن تضاف لكى يتم تغير الطور ، فإن درجة حرارة المادة لاترتفع

عندما تتحول مادة من طور إلى آخر تتغير طاقتها الداخلية . فالطاقة الداخلية لجزيئات الماء في بخار الماء أكبر من طاقتها الداخلية بعد أن تتكثف . كذلك فإن الطاقة الداخلية لجزيئات الماء في الثلج أقل منها في الماء السائل . لندرس الآن ما يحدث عندما يتغير طور المادة ، وسنبداً دراستنا بمناقشة تغير الطور من طور السائلة إلى طور البخار .



الكمية $c_p - c_v$ للغاز المثالي

تعتمد كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غاز بمقدار ΔT على طريقة تسخين الغاز . وهناك حالتان حديثان هامتان : (١) تسخين الغاز في وعاء ثابت الحجم ، (٢) تسخين الغاز في وعاء يتغير حجمه بحيث يظل الضغط ثابتاً ، وهذان البديلان موضحان في الشكل . لندرس الآن هذين الموقفين لإيجاد الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة الحرارة بنفس المقدار ΔT في كل حالة .

عندما يزود الغاز المثالي بالطاقة الحرارية قد تكتسب الجزيئات هذه الطاقة كبطاقة داخلية . وفي بعض الحالات يستهلك جزء من الطاقة الحرارية في بذل الشغل ضد القوى التي تحدد الغاز . فإذا حفظ حجم الغاز ثابتاً ، كما في الحالة I الموضحة في الشكل ، فلن يبذل أى شغل ضد القوى الخارجية التي تحفظ الكباس في مكانه لأن الكباس لا يتحرك . إذن ، تعطى الطاقة الحرارية ΔQ_v جميعها إلى الغاز وتستخدم في رفع الطاقة الداخلية للجزيئات . فإذا رمزنا للسعة الحرارية النوعية في هذه الحالة بالرمز c_v ، إذن :

$$\Delta Q_v = mc_v \Delta T$$

حيث m كتلة الغاز في الوعاء ، ويشير الدليل السفلي v إلى أن الحجم محفوظ ثابت .

في الحالة 2 تلزم كمية أكبر من الطاقة الحرارية لرفع درجة الحرارة بنفس المقدار ΔT . هذا لأن طاقة حركة الجزيئات يجب أن ترتفع بنفس المقدار كما في الحالة 1 ، لأن درجة الحرارة ترتفع بنفس المقدار في كل حالة . ولكن ، بالإضافة إلى ذلك ، يجب أن تبذل كمية من الشغل Fh ضد القوة المؤثرة على الكباس عندما يرتفع مسافة قدرها h .

إذن :

$$\Delta Q_p = mc_p \Delta T = \text{الزيادة في طاقة الجزيئات} + \text{الشغل المبذول ضد الكباس}$$

حيث يشير الدليل السفلي p إلى أن الضغط يظل ثابتاً . وحيث أن الزيادة في طاقة الجزيئات متساوية في الحالتين ، فإن هذه الكمية تساوى $mc_v \Delta T$ فإذا استعصنا عن ΔQ_p بالكمية $mc_p \Delta T$ وعوضنا عن الكميتين الموجودتين في الطرف الأيمن من المعادلة السابقة سنجد أن :

$$mc_p \Delta T = mc_v \Delta T + Fh$$

ولكن القوة المؤثرة على الكباس F هي مجرد الضغط مضروباً في مساحة الكباس A ، وعليه فإن $Fh = P_0 Ah$ حيث أن Ah هي الزيادة في حجم الوعاء ΔV نتيجة لارتفاع الكباس، فإن المعادلة السابقة يمكن أن تكتب كما يلي :

$$(c_p - c_v)m \Delta T = P_0 \Delta V$$

ويمكن تبسيط هذه المعادلة بتطبيق المعادلة (١٠ - ٢)، أى قانون الغاز المثالي، على الوعاء الابتدائي في الحالة 2 :

$$P_0 V_0 = nRT_0$$

وبعد التسخين، في الحالة 2، تتحول المعادلة إلى الصورة :

$$P_0(V_0 + \Delta V) = nR(T_0 + \Delta T)$$

وبطرح أولى هاتين المعادلتين من الثانية نحصل على :

$$P_0 \Delta V = nR \Delta T$$

وبالتعويض عن $P_0 \Delta V$ في المعادلة السابقة التي تحتوى على $c_p - c_v$ سنجد أن :

$$(c_p - c_v)m \Delta T = nR \Delta T$$

وباختصار المعاملات المتشابهة نجد أن :

$$c_p - c_v = \frac{nR}{m}$$

ولكن عدد الجزيئات الكيلوجرامية من الغاز n يرتبط بالوزن الجزيئي M وكتلة الغاز m الموجودة في الوعاء بالعلاقة $n = m/M$ ، إذن ، يمكننا أن نستعوض عن n/m بالمقدار $1/M$ لنحصل على :

$$c_p - c_v = \frac{R}{M}$$

وكما سوف ترى في المسألة ١٣ في نهاية هذا الفصل، تتفق هذه النتيجة النظرية جيداً مع البيانات المدرجة في الجدول (١١ - ٢).

إذا وضع سائل في طبق غير مغطى فإنه سوف يتبخر ببطء. وذلك نتيجة لأن طاقة جميع جزيئات السائل ليست متساوية. وقد وضعنا في الفصل الأخير أن بعض جزيئات الغاز طاقتها أكبر كثيراً من المتوسط، كما أن طاقة بعض الجزيئات الأخرى صغيرة جداً. وهذا صحيح أيضاً في حالة السوائل. فإذا كانت الجزيئات ذات الطاقة العالية جداً قريبة من سطح السائل فإنها قد تهرب بالفعل من الجزيئات الأخرى وتترك السائل. وهذه هي عملية التبخر.

والجزيئات المتبخرة هي الجزيئات ذات أعلى طاقة. وهي تسلب الطاقة من السائل، لذلك فإن التبخر يؤدي إلى نقص في متوسط الطاقة الداخلية للجزيئات المتبقية. وحيث أن درجة حرارة السائل ما هي إلا مقياس لطاقته الداخلية، فمن الواضح أن التبخر سوف يؤدي إلى تبريد السائل. وهذه العملية تمثل في الحقيقة أساساً لكثير من أجهزة التبريد.

الحرارة اللازمة ، أى الطاقة اللازمة ، لفصل وحدة الكتلة من الجزئيات عن بعضها البعض لتحويلها من طور السيولة إلى طور البخار تسمى حرارة تبخير السائل . وحيث أن جزئيات السائل أقل ارتباطا ببعضها البعض عند درجات الحرارة العالية عنها عند درجات الحرارة المنخفضة ، فإن الطاقة اللازمة لفصل الجزئيات تقل بزيادة درجة الحرارة . فمثلا ، حرارة تبخير الماء تساوى 590 cal/g عند درجة 10°C بينما تساوى 539 cal/g عند درجة 100°C بمعنى أن 590 cal من الطاقة الحرارية تلزم لفصل 1 g من جزئيات الماء عن بعضها البعض عند درجة 100°C . والعكس صحيح أيضا ، عندما يتكثف البخار متحولا إلى سائل تنطلق حرارة التبخير في هذه العملية . ويوضح الجدول (١١ - ٣) بعض القيم النموذجية لحرارة التبخير .

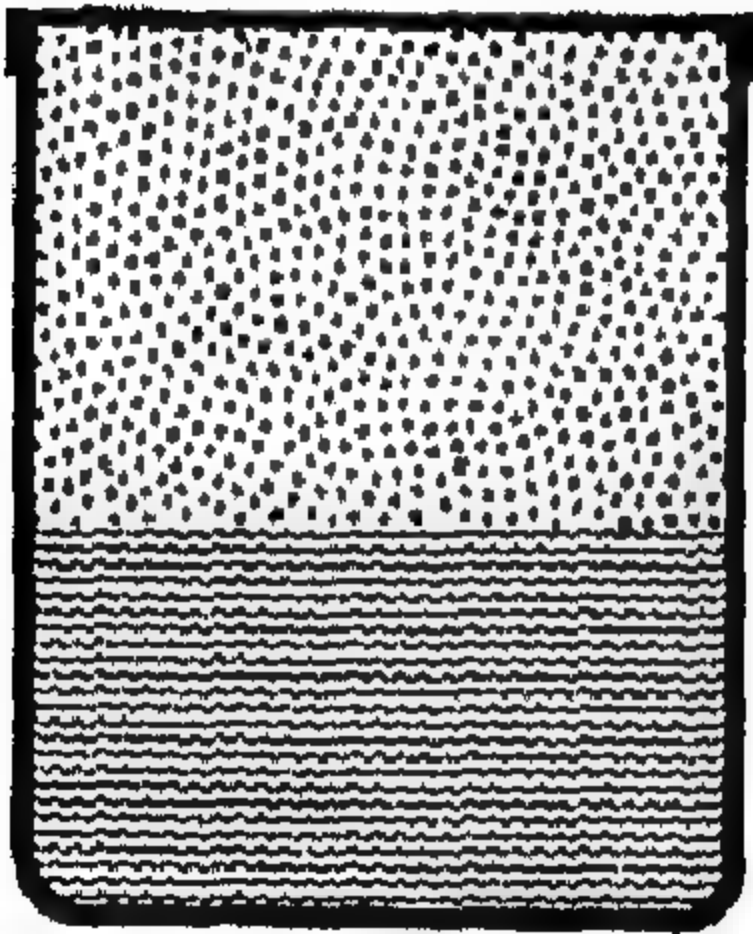
حرارة التبخير

جدول (١١ - ٣)

حرارة التبخير وحرارة الانصهار لبعض المواد .

المادة	نقطة الانصهار °C	نقطة الغليان °C	حرارة الانصهار cal/g	حرارة التبخير cal/g
رصاص	327		5.9	
ماء	0	100	80	539
زئبق	- 39	357	2.8	65
كحول ايثيل (ايثانول)	-114	+ 78	25	204
نيتروجين	-210	-196	6.1	48
أكسجين	-219	-183	3.3	51

تعطى حرارة تبخير السوائل عادة عند درجة الغليان العادية ، وذلك لأن السوائل تتبخر بسهولة كبيرة عندما تصل إلى هذه الدرجة . وفي الحقيقة فإن الفقاعات تتكون عندئذ في داخل السائل ، وتستخدم هذه الظاهرة كطريقة شائعة لمعرفة ما إذا كان السائل قد وصل إلى درجة غليانه . لنفحص الآن معنى درجة الغليان بدلالة حرارة تبخير الجزئيات .



شكل (١١ - ٤)

عندما يكون البخار مشبعاً ، يكون عدد جزئيات السائل التي تتبخر من السطح في زمن معين مساوياً لعدد الجزئيات التي تتكثف من البخار في نفس الزمن .

لنفرض أننا وضعنا سائلاً في وعاء مغلق مفرغ من الهواء . في هذه الحالة سوف تتبخر بعض جزئيات السائل إلى الفراغ الموجود فوق سطحه ، كما هو مبين في الشكل ١١ - ٤ . وبالطبع فإن العملية العكسية ممكنة ، فمن آن إلى آخر يصطدم جزيء بخار بسطح السائل ويلتصق به ، وكلما ازداد عدد الجزئيات في البخار ، كلما ازداد بالتالي عدد الجزئيات التي تعود إلى السائل . وعندما يزداد عدد الجزئيات في البخار إلى حد معين ، يصل النظام إلى حالة يكون فيها عدد الجزئيات التي تترك السائل مساوياً لعدد الجزئيات التي تعود إلى السائل من البخار . وعندئذ سوف يظل عدد الجزئيات في البخار ثابتاً عند هذا الحد إذا لم تتغير درجة

حرارة النظام ويقال أن البخار مشبعاً تحت هذه الشروط . ويعرف ضغط الجزئيات في البخار تحت هذه الشروط بضغط البخار للسائل . ويزداد ضغط البخار بارتفاع درجة الحرارة ، لأن الجزئيات تتبخر بسهولة أكبر عند درجات الحرارة الأعلى ، ويوضح الجدول ١١ - ٤ تغير ضغط البخار مع درجة الحرارة بالنسبة للماء . لاحظ أنه حتى الثلج له ضغط بخار محسوس .

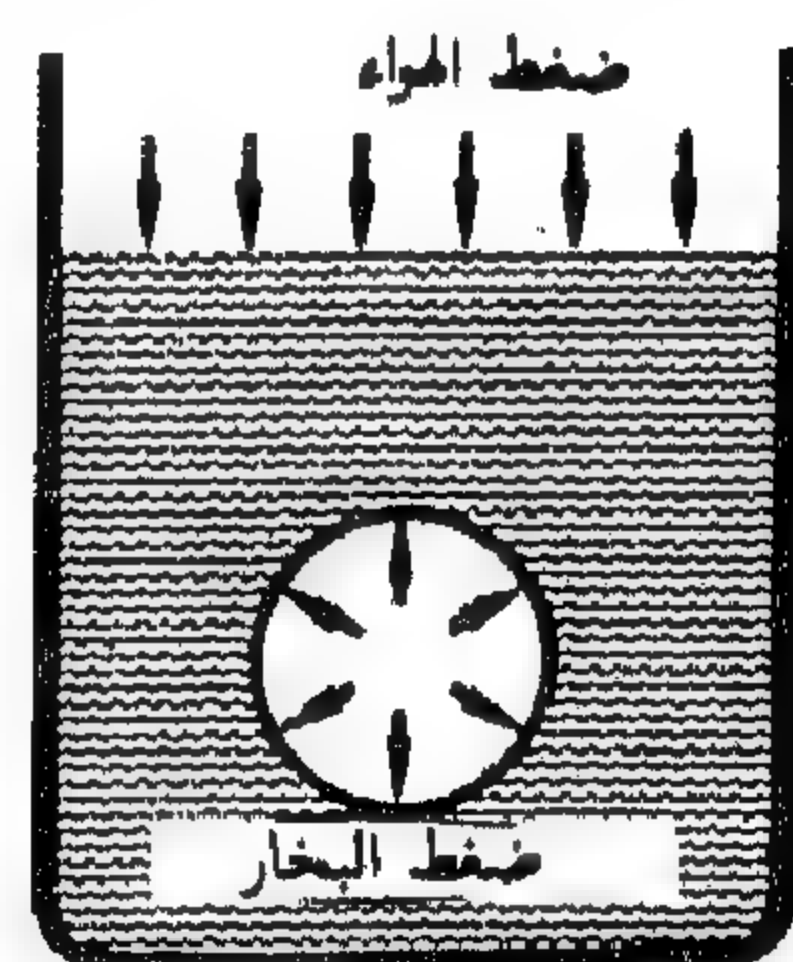
جدول (١١ - ٤)
ضغط البخار للماء والثلج .

درجة الحرارة ، °C	ضغط البخار ، mm Hg, or Torr	درجة الحرارة °C	ضغط البخار mm Hg, or Torr
-90	0.000070	90	526
-50	0.030	94	611
-10	1.95	99	733
0	4.58	100	760
10	9.21	110	1,075
30	31.8	150	3,570
60	149.4	200	11,650

* تعرف وحدة الضغط Torr بالعلاقة $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Hg}$. وقد سميت باسم العالم توريشلي .

يحدث بين حين وآخر أن تكتسب مجموعة من الجزئيات في داخل السائل طاقة كافية لفصلها من السائل فتكون فقاعة صغيرة ، ويمثل الشكل ١١ - ٥ حالة مبالغاً فيها بدرجة كبيرة . وعند درجات الحرارة المنخفضة يكون ضغط البخار داخل الفقاعة أصغر بدرجة كبيرة من الضغط الجوي فوق السائل . ومن ثم فإن الفقاعة تضمر وتتلاشى تحت تأثير ضغط الهواء قبل أن تجد الفرصة للنمو إلى حجم ملحوظ . ومع ذلك ، إذا رفعت درجة حرارة السائل يمكن أن نصل إلى نقطة يكون فيها ضغط البخار داخل الفقاعة مساوياً لضغط الهواء على سطح السائل . عندئذ لن تضمر الفقاعة وتتلاشى ، وبدلاً من ذلك فإنها سوف تنمو وترتفع إلى سطح السائل . ويحدث هذه العملية في أماكن متفرقة كثيرة داخل السائل تنشأ ظاهرة الغليان .

ومن الواضح أن السائل يغلي عند درجة الحرارة التي يكون فيها ضغط البخار للسائل مساوياً بالضبط للضغط الخارجى على السطح . ويستخدم التفريغ عادة في التطبيقات العلمية والصناعية عند تقطير السوائل . ذلك لأن الضغط الخارجى المنخفض يسمح للسائل بالغليان عند درجة حرارة منخفضة ويقلل احتمال التفاعل الكيميائى داخله .



شكل (١١ - ٥)
درجة الغليان هي درجة الحرارة التي يتساوى عندها ضغط البخار في الفقاعة مع الضغط الخارجى على السائل (حجم الفقاعة مبالغ فيه) .

وبهروب بخار السائل الذى يغلى ، تسلب الجزئيات ذات الطاقة العالية من السائل كمية من الطاقة . فإذا أريد الاستمرار في الغليان لابد أن تمد الحرارة باستمرار لكي

تعاود هذه الطاقة المفقودة . وإذا حاول أحدنا تسخين سائل فوق درجة غليانه تحت ضغط خارجي معين ، فإن السائل سوف يغلي بشدة أكثر فقط ، ولن ترتفع درجة حرارته أعلى من ذلك إلى أن يتبخر كلية . ويحدث الاستثناء الوحيد عندما تفشل الفقاعات في التكون ، وفي هذه الحالة يحمى السائل . وحيث أن الفقاعات تتكون أولاً بسهولة كبيرة على الشوائب كدقائق الغبار أو فقاعات الهواء ، فمن غير الغريب أن يحمى سائل نقي جداً لا يحتوي على أى غازات ذاتية فيه . وعندما تبدأ الفقاعات في التكون في مثل هذا السائل فإن ذلك يحدث بشدة كبيرة تقرب من الانفجار .

تعطى درجة غليان وحرارة التبخير لمختلف السوائل عادة في حالة الغليان تحت الضغط العياري وهو 760 mmHg (or Torr) . وتحت هذه الشروط تكون حرارة تبخير الماء 539 cal/g ودرجة غليانها 100°C ، بالطبع . ومن المهم أن نلاحظ أن الضغط الجوي في منطقة روكي ماونتين (Rocky Mountain) في المدن التي ترتفع أكثر من ميل واحد عن سطح البحر كمدينة دنفر (Denver) وتشين (Cheyenne) ولارامي (Laramie) أقل كثيراً من 760 Torr ، إذ يبلغ الضغط على هذه الارتفاعات حوالي 600 Torr ولذلك يغلي الماء عند حوالي 94°C . لماذا تعتبر قدور الضغط هامة جداً في هذه الظروف ؟

١١ - ٦ حرارة الانصهار والصلابة

تنصهر بلورات الثلج عند درجة 0°C تحت الضغط العياري (76 cm Hg) . وقبل الانصهار تكون جزيئات الماء مرتبة في نسق بلوري محكم ، وتحفظ الجزيئات ثابتة في مواضعها بواسطة قوى تجاذب كبيرة بين الجزيئات . ولصهر البلورة يجب أن تنتزع الجزيئات من هذا الترتيب المحكم وتسبب خلل نظامها . وتحتاج هذه العملية إلى طاقة تزود بها المادة على هيئة حرارة عادة .

نرى من ذلك إذن أن المادة البلورية ، عند تسخينها ، تبدأ في الانصهار عند درجة حرارة معينة . وعند إضافة الحرارة إلى خليط من المادة البلورية والسائل تظل درجة الحرارة ثابتة إلى أن يتم انصهار جميع البلورات . ولكل مادة نقطة انصهار معينة ، ولكي تنصهر المادة البلورية يجب تزويدها بكمية معينة من الحرارة عند هذه الدرجة . وتعرف حرارة الانصهار بأنها كمية الطاقة الحرارية اللازمة لصهر وحدة الكتلة من المادة البلورية . وتنطلق نفس هذه الكمية من الحرارة إلى الوسط المحيط عندما تتبلور وحدة الكتلة من السائل . وحرارة انصهار الماء هي 80 cal/g ، ويوضح الجدول ١١ - ٣ قيم حرارة الانصهار لبعض المواد الأخرى . ويلاحظ من هذا الجدول أن حرارة انصهار وحرارة تبخير المواد ذات الرابطة الأيونية ، كالماء والكحول الإيثيلي (الإيثانول) أكبر من الأخرى . لماذا ؟

تعريف
حرارة
الانصهار

يجب أن نذكر هنا بعض التأثيرات الأخرى لظواهر الانصهار . أولا ، بعض اللدائن كالبوليثلين متبلورة جزئيا ، أى أن جزءا فقط من المادة الصلبة يوجد في حالة مرتبة ، بينما يوجد الجزء الآخر في حالة السيولة ، والجزءان ممتزجان مزجا حميما . لهذا فإن الخواص الفيزيائية للمادة وسط بين الجوامد والسوائل . وتختلف تلك المناطق المتبلورة في درجة الكمال ، والبلورات الأقل كالا تنصهر عند درجة حرارة أقل من نقطة انصهار البلورات الأكثر كالا : ومن ثم فإن لهذه المواد مدى انصهار - وليس نقطة انصهار - قد تصل سعته 20°C أو أكثر . ويراعى عند استخدام الجداول أن نقطة الانصهار المسجلة لمثل هذه المواد تكون عادة درجة الحرارة التى تختفى عندها درجة التبلور تماما .

وبعض اللدائن الأخرى ، كالبوليستيرين ، مواد زجاجية صافية صلبة . وهذه المواد ، كما وضعنا في الفصل التاسع ، هى مجرد سوائل لزجة جدا ، وجزئياتها ليست مرتبة بنظام كما في الجوامد . وبالرغم من أنها تلين عند درجة محددة تماما ، إلا أن حرارة الانصهار لا تدخل في هذه العملية كما في حالة انصهار المادة البلورية .

يمكن تغيير درجة تجمد السوائل إلى حد ما بتطبيق ضغط كبير على النظام . فإذا كانت المادة تنكمش عند تجمدها فإن درجة التجمد سوف ترتفع بزيادة الضغط ، وهذا هو سلوك معظم المواد بالفعل . ولكن قليلا من المواد ، كالماء يتمدد عند التجمد ، وفي هذه الحالة تسبب زيادة الضغط انخفاض نقطة تجمد هذه المواد . لذلك فإن ضغط المترج على الثلج قد يسبب انصهار الثلج تحته . وفي هذه الحالة يتزج المترج حقيقة على ثلج مشحم بغشاء رقيق من الماء .

١١ - ٧ قياس كمية الحرارة (الكالوريمترية)

يمكن توضيح كثير من المواقف المتعلقة بالتبادل الحرارى بتطبيق المعادلة البسيطة الآتية :

$$\text{الحرارة المكتسبة} = \text{الحرارة المفقودة}$$

وعموما ، تتضمن هذه المواقف تبادل الحرارة داخل وعاء معزول - المسعر - الذى يعزل النظام عزلا جيدا عن الوسط المحيط . والمعادلة السابقة ببساطة هى صيغة لقانون بقاء الطاقة . وسوف نوضح استخدامها ببعض الأمثلة .

- ١ - عند تسخين كتلة من المادة m (أو تبريدها) ، عددا معيناً من درجات الحرارة ΔT ، فإنها تكتسب (أو تفقد) كمية من الحرارة تعطى بالمعادلة (١١ - ١) ، وبالتحديد :

$$mc\Delta T$$

(يفترض عدم حدوث تغير في الطور في هذا المدى من درجات الحرارة) .

٢ - عندما تنصهر كتلة من المادة m (أو تتبلور) ، فإنها تكتسب (أو تفقد) كمية من الحرارة قدرها :

$$mH_f$$

حيث H_f حرارة الانصهار .

٣ - عندما تتبخر كتلة من المادة m (أو تتكثف) ، فإنها تكتسب (أو تفقد) كمية من الحرارة قدرها :

$$\dot{m}H_v$$

حيث H_v حرارة التبخر .

مثال توضيحي ١١ - ٤ : سخنت قطعة من الرصاص كتلتها 100 g إلى درجة 100°C ثم اسقطت في تجويف في قالب كبير من الثلج درجة حرارته 0°C . ماهي كمية الثلج التي سوف تذوب ؟

طريقة الحل :

الحرارة المستخدمة لصدف الثلج = الحرارة المفقودة بواسطة الرصاص

$$m_{\text{Pb}}c_{\text{Pb}}\Delta T = m_w H_{fw}$$

$$(100\text{ g})(0.031\text{ cal/(g)}(^\circ\text{C}))(100 - 0^\circ\text{C}) = (m_w)(80\text{ cal/g})$$

$$m_w = 3.9\text{ g}$$

استخرجت الثوابت المختلفة من الجدولين ١١ - ١ و ١١ - ٣ .

مثال توضيحي ١١ - ٥ : إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية لمسر على هيئة علبة من النحاس كتلتها 10 g ، ويحتوى على 20 g من الثلج ، هي -30°C ، فما هي كمية بخار الماء (درجة حرارته 100°C) التي يجب أن تتكثف في هذه العلبة لكي يتحول الثلج إلى ماء . ويسخن إلى درجة 40°C ؟

طريقة الحل :

الحرارة المكتسبة بواسطة الثلج والعلبة = الحرارة المفقودة بواسطة البخار

يجب أن يتكثف بخار الماء أولاً متحولاً إلى ماء درجة حرارته 100°C وبعد ذلك يجب أن يبرد الماء إلى درجة الحرارة النهائية وقدرها 40°C . إذن :

$$\begin{aligned} \text{الحرارة المفقودة} &= mH_v + mc \Delta T \\ &= (m)(540) + (m)(1)(100 - 40) = 600m \end{aligned}$$

وتحتاج العلبة فقط إلى تسخينها من -30°C إلى $+40^{\circ}\text{C}$. ومن ناحية أخرى يلزم أن يدفء الثلج إلى درجة 0°C ثم ينصهر متحولاً إلى ماء وبعد ذلك يسخن الماء إلى درجة 40°C .

الحرارة المكتسبة

$$\begin{aligned} &= (m_{\text{Cu}}c_{\text{Cu}})(70) + (m_{\text{ice}}c_{\text{ice}})(30) + m_{\text{w}}H_{\text{fw}} + (m_{\text{w}}c_{\text{w}})(40) \\ &= (10)(0.093)(70) + (20)(0.50)(30) + (20)(80) + (20)(1)(40) \\ &= 65 + 300 + 1600 + 800 \\ &= 2765 \text{ cal} \end{aligned}$$

وقد حذفت الوحدات من هذه المعادلات لتوفير حيز الورقة ، وننصحك بكتابة المعادلة مرة ثانية مستخدماً فيها الوحدات للتحقق من صحة وحدات الإجابة . وبمساواة الحرارة المكتسبة بالحرارة المفقودة نحصل على كتلة بخار الماء المطلوبة :

$$m = \frac{2765}{600} = 4.6 \text{ g}$$

لاحظ أن كمية بخار الماء اللازمة صغيرة جداً . ومن الواضح أن البخار قد فقد الكمية الأكبر من الحرارة أثناء عملية التكثف ، وبالتحديد 2500 cal من الكمية الكلية وقدرها 2765 cal . يمكنك أن تفهم من ذلك لماذا يمكن أن يسبب البخار الساخن في ظروف معينة حروقاً أشد من الحروق التي يسببها الماء الساخن .

مثال توضيحي ١١ - ٦ : اصطدمت طلقة من الرصاص كتلتها 10 g تسير بسرعة قدرها 100 m/s بقلب من الخشب فدفنت نفسها فيها . ماهو الارتفاع في درجة حرارة الطلقة بالتقريب نتيجة للتصادم ؟

طريقة الحل : افترض أن طاقة حركة الطلقة بأكملها تتحول إلى حرارة كامنة في الطلقة . (هل يمكنك إثبات هذا الفرض ؟) . وعليه فإن الحرارة المكتسبة بواسطة الطلقة ستساوي طاقة حركتها المفقودة .

$$\begin{aligned} \text{طاقة حركة الطلقة} &= \frac{1}{2}mv^2 \\ &= (\frac{1}{2})(0.010 \text{ kg})(100 \text{ m/s})^2 = 50 \text{ J} = 12 \text{ cal} \end{aligned}$$

لاحظ تحويل الوحدات من الجول إلى السعرة .

$$m_{pb} c_{pb} \Delta T = \text{الحرارة المكتسبة}$$

$$12 \text{ cal} = (10 \text{ g})[0.031 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}] \Delta T$$

$$\Delta T = 39^\circ\text{C}$$

وعليه ، إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للطلقة 20°C فإن درجة حرارتها النهائية ستكون 59°C . وإذا كانت الطلقة تتحرك بسرعة قدرها 600 m/s ، يمكننا أن نجد باستخدام الطريقة السابقة أن ΔT أكبر 36 مرة من القيمة السابقة ، أى أن درجة الحرارة النهائية ستكون 1430°C . وبالطبع فإن الطلقة سوف تنصهر قبل الوصول إلى هذه الدرجة ، وبالتالي فإن الحسابات السابقة لن تكون صحيحة . كيف يمكن إجراء الحسابات في الحالة الأخيرة ؟

مثال توضيحي ١١ - ٧ : عندما يقول المتخصصون في التغذية أن 1 kg من الخبز قيمته الغذائية هي 2600 cal فإنهم يعنون أنه إذا حرق الخبز المجفف في الأكسجين النقي فإنه سوف يعطى 2600 cal من الطاقة الحرارية . (يولد الجسم الحرارة من الوقود أساسا بتفاعل كيميائي مشابه) . قدر كمية الطاقة الحرارية التي يطلقها الجسم كل يوم .

طريقة الحل : يختلف السعر الغذائي اليومي للإنسان من شخص إلى آخر ، ولكنه يتراوح بين 2000 سعر و 3000 سعر . وحيث أن هذه السعرات هي في الحقيقة سعرات كبيرة ، فإن عملية الأيض (التفاعل الحيوى) في داخل الجسم تولد حوالى $2 \times 10^6 \text{ cal}$ من الحرارة . وحيث أن درجة حرارة الجسم تظل ثابتة تقريبا . فإن الجسم يجب أن يفقد هذه الطاقة عند تولدها . وفي الحقيقة فإن طرق توليد هذه الطاقة داخل الجسم وإطلاقها معقدة جدا ، وهى تناقش في كتب الكيمياء الحيوية والفيزياء الحيوية . وبالرغم من ذلك فإننا نعلم أن هواء الزفير وتبخر العرق من الجلد هما طريقتان معروفتان جيدا لتبريد الجسم ، ولكن هناك طرقا أخرى على نفس الدرجة من الأهمية .

١١ - ٨ التمدد الحرارى

رأينا مما سبق أن درجة حرارة المادة مقياس للطاقة الداخلية لجزيئاتها . وعند رفع درجة حرارة السائل أو الجامد تزداد طاقة جزيئاته وبالتالي تزداد سعة اهتزازها ، وهذا يؤدي إلى زيادة متوسط المسافة بين كل جزيء والجزيئات المجاورة . أى أن السائل أو الجامد يتمدد عند رفع درجة حرارته . وبالرغم من

وجود بعض الاستثناءات الواضحة من هذه القاعدة (الماء ، مثلاً ، ينكمش* عند رفع درجة حرارته في المدى من 0°C إلى 4°C) فإن معظم المواد تتمدد بارتفاع درجة الحرارة ، بشرط عدم حدوث تغير في الطور .

من الواضح أن التمدد الحرارى للمعدن في بناء أو قنطرة يمكن أن يكون أمراً ذا أهمية عملية كبيرة . فإذا لم يؤخذ التمدد الحرارى في الاعتبار فإن قضبان السكك الحديدية وخرسانة الطرق السريعة سوف تنبعج تحت تأثير شمس الصيف الساخنة . كذلك فإن كثيراً منا قد عاش أو عمل في أبنية تؤدي فيها مواسير التطويل التي يمر بها البخار في أنظمة التدفئة إلى تأثيرات واضحة . لهذه الأسباب ، ولأسباب أخرى كثيرة ، من الضروري أن نعرف بدقة كيف تتمدد المادة مع درجة الحرارة . لهذا الغرض تم تعريف وجدولة ثابتين للتمدّد الحرارى هما ثابت التمدد الحرارى الطولى α (الفا) وثابت التمدد الحرارى الحجمى γ (جاما) .

تعريف يعرف معامل التمدد الحرارى الطولى α بأنه الزيادة في الطول لوحدة الأطوال من المادة نتيجة لتغير درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة . ويكتب هذا التعريف على هيئة معادلة كمايلي :

$$\alpha = \frac{\Delta L / L}{\Delta T}$$

أى أنه إذا تمدد قضيب طوله L بمقدار ΔL نتيجة لرفع درجة الحرارة بمقدار ΔT ، فإن قيمة α تعطى بالمعادلة السابقة . لاحظ أن وحدات الطول تختصر ، وعليه فإن وحدات α هي مقلوب درجة الحرارة ، أى 1°C^{-1} or 1°F^{-1} . ويمثل الجدول ١١ - ٥ بعض القيم الفعلية للمعامل .

وعلى سبيل المثال ، إذا رفعت درجة حرارة قضيب من النحاس طوله L m بمقدار ΔT فإنه سوف يستطيل بمقدار ΔL يعطى من تعريف α بالعلاقة :

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T \quad (١١ - ٢)$$

فإذا كان طول القضيب L هو 1.00 m وكان الارتفاع في درجة الحرارة هو 50°C فإن (استخرج قيمة α من الجدول ١١ - ٥) :

* في الماء تسبب الرابطة الايدروجينية تجمع الجزيئات في مجموعات من عدة جزيئات لكل منها ترتيب محدد حتى فوق درجة انصهار الثلج . وبارتفاع درجة الحرارة تنكسر هذه المجموعات مما يؤدي إلى ترتيب جديد أكثر تضاماً للجزيئات .

$$\Delta L = (1.00 \text{ m})(19 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})(50^{\circ}\text{C}) = 0.00095 \text{ m}$$

جدول (١١ - ٥)

معاملات التمدد الحرارى لكل درجة سلسيوس عند
20°C لبعض المواد .

المادة	$\alpha, *$ $\times 10^6$	$\gamma, *$ $\times 10^6$
ماس	1.2	3.5
زجاج (مقاوم للحرارة)	~3	~9
زجاج (لين)	~9	~27
حديد	12	36
قزميد وخرسانة	~10	~30
نحاس أصفر	19	57
المنيوم	25	75
زئبق		182
مطاط	~80	~240
جلسرين		500
جازولين		~950
كحول ميثيل (ميثانول)		1200
بنزين		1240
اسيتون		1490

* تعنى الدلالة الموجودة في رأس العمود أن جميع قيم α

و γ مضروبة في 10^6 ، إذن α للحديد هو $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

وحيث أن التغير في الطول صغير جدا في الواقع ، فإن قيمة L المستخدمة لتعيين ΔL ليست حساسة بدرجة كافية لأن نهم كثيرا بدرجة حرارة قياسه . وفي الحقيقة ، يتغير α قليلا مع درجة الحرارة ، لذلك يجب استخدام القيمة المناسبة لكل مدى معين من درجات الحرارة في حالة الحسابات عالية الدقة . ومع ذلك ، من النادر جدا أن يكون لهذا التعقيد أية أهمية في التطبيقات العملية .

تعريف يعرف معامل التمدد الحرارى الحجمى لمادة ما بطريقة مشابهة لمعامل التمدد الحرارى الطولى . وعليه فإن معامل التمدد الحرارى الحجمى هو التغير النسبى في الحجم لكل درجة ، أو ، في صورة معادلة :

$$\gamma = \frac{\Delta V/V}{\Delta T}$$

ومنه نجد مباشرة أن :

$$\Delta V = \gamma V \Delta T \quad (١١ - ٣)$$

وحدات γ هي مقلوب درجة الحرارة . وكمثال لتطبيق هذه المعادلة افترض أن 100 cm^3 من البنزين قد سخنت من 20°C إلى 25°C . في هذه الحالة سوف يتغير الحجم بمقدار (استخرج قيمة γ من الجدول ١١ - ٥) .

$$\Delta V = (1.24 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(100 \text{ cm}^3)(5^\circ\text{C}) = 0.62 \text{ cm}^3$$

وهذا التغير يمثل 0.6% من الحجم الأصلي وهو تغير كبير في V لكثير من الأغراض . من الضروري إذن تحديد درجة الحرارة المقاس عندها V إذا أريد استخدام قيم γ المدرجة في الجدول ١١ - ٥ ؛ لاحظ أن هذه القيم صحيحة عند درجة الحرارة 20°C . وبالطبع يمكن حساب ΔV للتغيرات الصغيرة في درجة الحرارة التي لا تبعد كثيرا عن $T=20^\circ\text{C}$ بدقة كبيرة باستخدام قيمة V المقاسة عند أى درجة تقع في هذا المدى الصغير من درجات الحرارة .

يبين فحص الجدول ١١ - ٥ أن معامل التمدد الطولى للجوامد يساوى ثلث معامل التمدد الحجمى تقريبا . وهذه قاعدة عامة لمعظم الجوامد المتجانسة ، أى ذات الخواص الواحدة في الاتجاهات المختلفة . وسوف نترك للطلاب إثبات صحة هذه القاعدة باستخدام تعريفى α و γ كتمرين .

مثال توضيحي ١١ - ٨ : لوح من الخرسانة في طريق سريع طوله 20 yd . مامقدار الزيادة في طوله عند درجة 126°F عن طوله في درجة 0°F ؟
طريقة الحل : نعلم أن :

$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

من الجدول ١١ - ٥ نجد أن $\alpha \approx 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ولاستخدام العلاقة السابقة يجب أن تكون درجة الحرارة مقاسة بدرجة سلسيوس . إذن $\Delta T = 126^\circ\text{F} = (\frac{5}{9})(126) = 70^\circ\text{C}$ وعليه :

$$\Delta L = (10^{-5})(70)(20 \text{ yd}) = 14 \times 10^{-3} \text{ yd} = 0.5 \text{ in}$$

وتظهر هذه الزيادة في صورة شق تمددى بهذا الحجم أو انبعاج في الخرسانة .

مثال توضيحي ١١ - ٩ : في وقت متأخر من المساء ملأ مالك سيارة خزان وقودها بالجازولين تماما ثم أوقفها في مرأب (جراج) . وكانت درجة حرارة الجازولين في ذلك الوقت 68°K ، بينما كانت سعة الخزان 16 gal . وعندما عاد في اليوم التالى كانت الشمس قد سخنت الجازولين إلى درجة 131°F . ماكمية الجازولين التي فاضت من الخزان ؟

طريقة الحل : أولا يجب تحويل درجتى الحرارة إلى مقياس سلسيوس لكى يكمننا استخدام العلاقة (١١ - ٣) . عندئذ سنجد أن درجتى الحرارة المذكورتين في نص المسألة يعادلان 20°C و 55°C . وحيث أن درجة الحرارة الابتدائية هي 20°C ، لن

يكون من الخطأ استخدام قيمة γ المدرجة في الجدول ١١ - ٥ . من تعريف γ نجد أن :

$$\Delta V = \gamma V \Delta T = (0.95 \times 10^{-3})(16)(35) = 0.53 \text{ gal}$$

وحتى إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية 55°C فإن الخطأ الناتج من استخدام الحجم عند تلك الدرجة لحساب ΔV سيساوى 3% فقط ، لأن ΔV يساوى 3% فقط من الحجم الكلى . ومع ذلك ، إذا كان الحجم الابتدائى مقاسا عند درجة حرارة معينة T تختلف عن 20°C ، وكانت الدقة العالية مطلوبة ، يجب علينا أولا إيجاد الحجم عند درجة 20°C باستخدام العلاقة :

$$\Delta V = \gamma V_{20}(T - 20)$$

حيث :

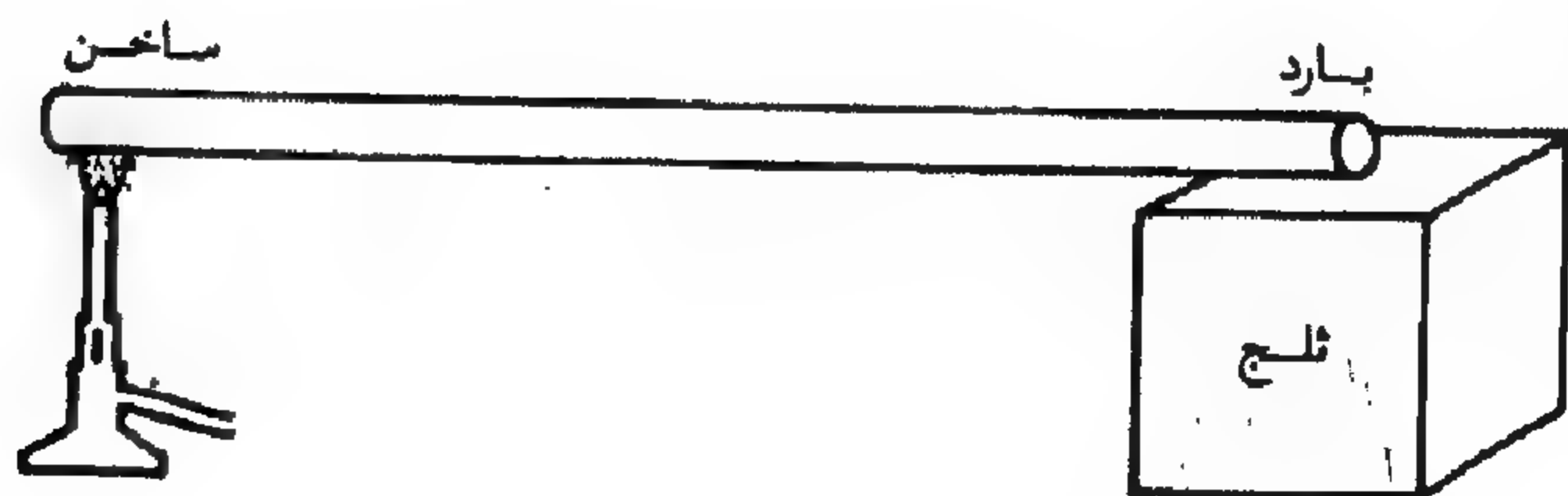
$$\Delta V = V - V_{20}$$

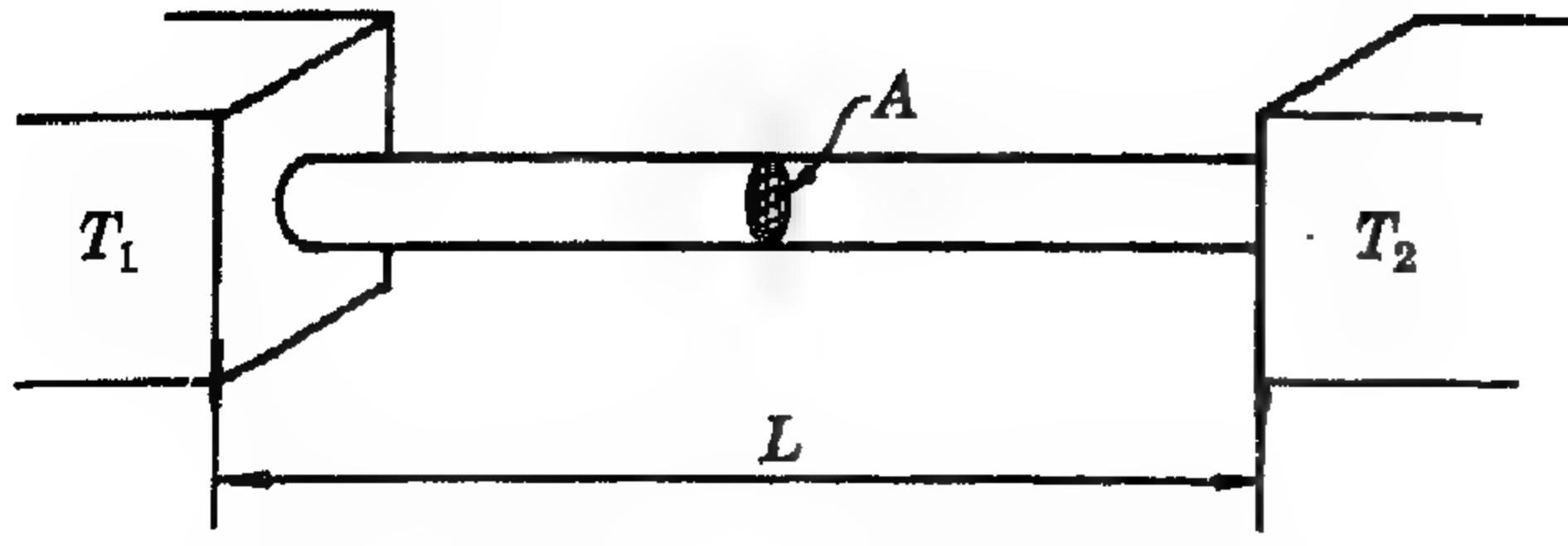
و V هو الحجم المقاس عند درجة الحرارة المعينة . يلاحظ أننا أهملنا تمدد خزان الجازولين نفسه . هل هذا خطأ كبير ؟

١١ - ٩ انتقال الحرارة : التوصيل

تمثل طاقة حركة جزيئات المادة ، كما رأينا ، الجزء الاعظم من الطاقة الحرارية في المادة . وعملية انتقال الحرارة واضحة تمام الوضوح في انتقال الطاقة الحرارية من الطرف الساخن للقضيب معدنى إلى طرفه البارد ، كما هو موضح فى الشكل ١١ - ٦ . وتتم هذه العملية بالطريقة الآتية . تكتسب الجزيئات الموجودة فى الطرف الساخن طاقة عالية فتزداد سعة اهتزازها . نتيجة لذلك تصطدم هذه الجزيئات بالجزيئات الأبرد الموجودة على يمينها فتنتقل إليها جزءا من طاقتها . وهذه بالتالى تضرب الجزيئات البطيئة الموجودة على يمينها فتكسبها طاقة إضافية وهكذا . وعليه فإن الحرارة تنتقل فى القضيب بواسطة التصادمات الجزيئية . وتسمى هذه الطريقة بالتوصيل .

شكل (١١ - ٦)
تتحرك الحرارة من الطرف
الساخن للقضيب المعدنى إلى
الطرف البارد بالتوصيل .





شكل (١١ - ٧)
يتناسب معدل انسياب
الحرارة في القضيب طوياً مع
 $T_1 - T_2$ و A ، وعكسياً مع
 L .

تعتمد سرعة انسياب الحرارة في القضيب على المادة المصنوع منها . ونحن نعلم جميعاً أن المعدن يوصل الحرارة أحسن من الخشب أو الزجاج . وهناك قاعدة عامة إلى حد ما تنص على أن الموصلات الكهربائية الجيدة موصلات حرارية جيدة . فالمعادن ، على وجه الخصوص ، موصلات جيدة للحرارة لأن الإلكترونات التكافؤ تتحرك حرة تقريباً في المعدن حاملة معها طاقة الحركة (الحرارة) إلى أى مكان .

ولكى نعبر عن سريان الحرارة رياضياً ، لتتخيل التجربة الموضحة في الشكل ١١ - ٧ الذى يمثل قضيباً معدنياً مساحة مقطعه A وطوله L متصلاً بجهازين درجتا حرارتهما T_1 ، T_2 (حيث $T_1 > T_2$) ثابتان . وحيث أن $T_1 > T_2$ فإن الطاقة الحرارية سوف تنساب في القضيب من الطرف الساخن إلى الطرف البارد . لنسأل الآن ماهى كمية الحرارة ΔQ التى تنساب في القضيب في الزمن t . (افترض أن جوانب القضيب معزولة بحيث لا تستطيع الحرارة أن تنساب منه في اتجاه نصف القطر) .

يمكننا أن نفترض أنه كلما زادت A ، كلما زادت كمية الحرارة المنسابة . إذن $\Delta Q \propto A$. وأيضاً لن تنساب أى حرارة إذا كانت $T_1 = T_2$. وكنتمين أولاً يمكننا أن نقول أن $\Delta Q \propto T_1 - T_2$ وإذا كان القضيب طويلاً جداً ، من المرجح أن يقل انسياب الحرارة ، ومن ثم يمكننا أن نفترض أن $\Delta Q \propto 1/L$. وبالطبع كلما كان الزمن t أطول ، كلما زادت كمية الحرارة المنسابة . وقد ثبت أن جميع هذه الافتراضات صحيحة ، إذ تبين من التجربة أن :

$$\Delta Q = \frac{\lambda(T_1 - T_2)At}{L} \quad (١١ - ٤)$$

حيث λ (لامدا) ثابت تناسب يسمى الموصلية الحرارية لمادة القضيب . ومن الواضح أن λ تكون كبيرة في حالة الموصل الجيد للحرارة ، وصغيرة في حالة الموصل الرديء . ويمثل الجدول ١١ - ٦ بعض القيم الفعلية للموصلية الحرارية . لاحظ أن الوحدات التى يجب استخدامها فى المعادلة (١١ - ٤) هى الوحدات المذكورة فى جدول الموصلية الحرارية .

جدول (١١ - ٦)
الموصلية الحرارية بالوحدات
 $\text{cal}/(\text{cm})(\text{s})(^\circ\text{C})$ لبعض المواد .

الماء	λ
فضة	1.0
نحاس	1.0
النهر	0.50
نحاس أصفر	0.20
زجاج	$\sim 20 \times 10^{-4}$
ورق اسبستوس	$\sim 5 \times 10^{-4}$
مطاط	$\sim 5 \times 10^{-4}$

مثال توضيحي ١١ - ١٠ : قضيب من النحاس الأصفر مساحة مقطعه $A = 2.0 \text{ cm}^2$ وطوله $L = 1.00 \text{ m}$. وضع أحد طرفي هذا القضيب في ماء يغلي ،

ووضع الآخر على كمكة من الثلج . ماهى كمية الثلج التى تنصهر بواسطة الحرارة المنتقلة من الطرف الساخن للقضييب إلى الطرف البارد فى زمن قدره 10 min ؟

طريقة الحل : نوجد أولا كمية الحرارة المنتقلة فى القضييب . بمعطيات المسألة بالوحدات المناسبة هى كالتالى : $A = 2.0 \text{ cm}^2$ ، $L = 100 \text{ cm}$ ، $\lambda = 0.20 \text{ cal/(cm)(s)(}^\circ\text{C)}$ ، $t = 600 \text{ s}$ ، $T_1 - T_2 = 100^\circ\text{C}$. بالتعويض فى المعادلة (١١ - ٤) نحصل على :

$$\Delta Q = 240 \text{ cal}$$

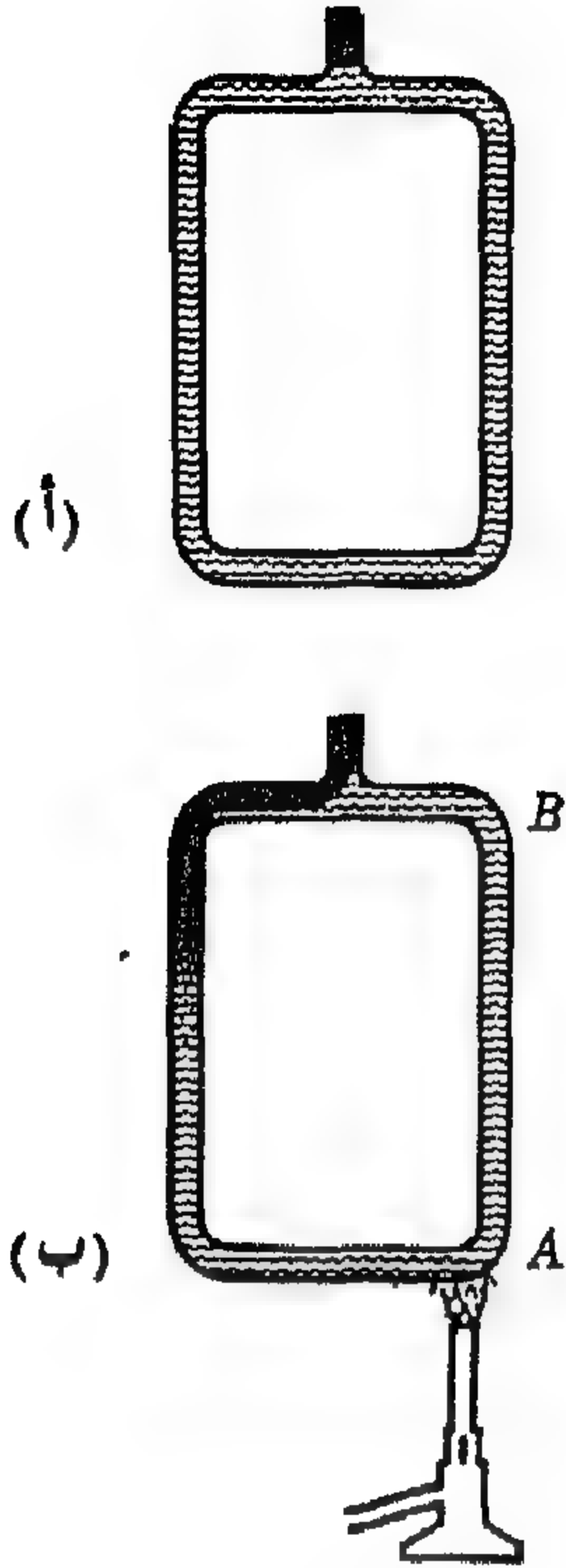
ولكن كمية الحرارة اللازمة لصهر 1 g من الثلج هى 80 cal . إذن كمية الثلج المنصهر فى هذا الزمن تساوى 240/80 g أو 3.0 g .

١١ - ١٠ انتقال الحرارة : الحمل

يمثل الشكل ١١ - ٨ تجربة بسيطة توضح ظاهرة الحمل . فإذا ملأنا الأنبوبة المهيئة فى الشكل بالماء ثم وضعنا قليلا من الصبغة الملونة قرب رقبتها فإنها سوف تظل ساكنة تقريبا فى مكانها كما فى الجزء أ . ولكن عند تسخين الأنبوبة كما هو مبين فى الجزء ب فإن السائل سوف يبدأ فى الانسياب داخل الأنبوبة عكس اتجاه عقارب الساعة ، حاملا معه الصبغة كما هو موضح .

وسبب هذه الحركة بسيط جدا . ذلك أن السائل أو الغاز يتمدد عند تسخينه ، ولذلك فإن الماء الموجود فى الركن الأيمن السفلى للأنبوبة عند A يتمدد نتيجة للتسخين فيصبح أخف من باقى السائل . ولهذا فإن العمود الأيمن من السائل لن يستطيع الاستمرار فى موازنة حمل العمود الأيسر الثقيل ، ولذلك فإن العمود الأيسر سوف يهبط فى الأنبوبة ، وينساب السائل نتيجة لذلك فى الجانب الأيسر إلى أعلى . وباستمرار هذا السائل فى الحركة تنخفض درجة حرارته ويصل بعد فترة من الزمن إلى الجانب الأيسر ، حيث يصبح أبرد وأكثر كثافة عما كان عند النقطة A . والخلاصة هى أن السائل المسخن عند A سوف يرتفع إلى B حاملا الحرارة معه . أى أن الحرارة قد انتقلت من A إلى B نتيجة لحركة السائل نفسه من A إلى B . وتسمى هذه الطريقة لانتقال الحرارة بالحمل .

لاحظ أن التوصيل لا يتضمن حركة الجزيئات لمسافات كبيرة ، إذ تنتقل الحرارة من جزيء إلى آخر بالتصادم . أما فى الحمل فإن جزيئات المادة الناقلة للحرارة تتحرك من مكان إلى آخر حاملة معها الحرارة . والسوائل والغازات فقط هى التى تنقل الحرارة بالحمل لأن جزيئات هذه المواد فقط هى التى تستطيع أن تتحرك لمسافات كبيرة .



شكل (١١ - ٨)

تبين الصبغة أن السائل يدور فى الأنبوبة عند تسخينه فى عكس اتجاه عقارب الساعة . وتنتقل الحرارة بواسطة السائل أثناء دورانه ، مما يؤدي إلى الحمل الحرارى .

الحمل
الحرارى

يدفأ كثير من المنازل بطرق الحمل الهوائى . والحركة الدورانية للهواء محسوسة بدرجة كافية حتى فى حالة أنظمة التدفئة التى لا تحتوى على مراوح . فمثلا ، إذا وقف شخص قرب جهاز التحكم فى خروج الهواء الساخن من فرن هوائى فإنه سيلاحظ اندفاع الهواء الساخن بوضوح من جهاز التحكم . ويجب أن يسمح تصميم أجهزة الحمل هذه للهواء البارد بالعودة إلى الفرن تماما كما يعود السائل البارد إلى النقطة A فى الشكل ١١ - ٨ ب . ومن الواضح أن الغرض من استخدام أجهزة تحكم الهواء البارد فى أنظمة التدفئة هو إعادة الهواء البارد إلى الفرن .

وتنشأ الظواهر الجوية جزئيا نتيجة لتيارات الحمل الهوائية ، وتعتبر تيارات حمل الهواء قرب حواف السلاسل الجبلية ذات أهمية خاصة فى هذا الشأن . ففى أوقات محددة مختلفة يوميا تلاحظ تأثيرات كبيرة فى الطقس نتيجة لهبوط الهواء البارد من الجبال مما يعمل على رفع الهواء الدافئ فى السهول القريبة إلى أعلى ويساعد ذلك على تلطيف الجو . ويعتبر كذلك تيار الخليج مثالا آخر لانتقال الحرارة بالحمل على نطاق واسع .

١١ - ١١ انتقال الحرارة : الإشعاع

نعلم جميعا أن الشمس تدفئ الأرض ، والشمس فى الحقيقة هى مصدرنا الأساسى للحرارة . ويمكننا أن نرى بسهولة أن الحرارة التى تصل إلينا من الشمس لا تنتقل إلينا بالتوصيل أو الحمل . ذلك أن الفراغ الهائل بيننا وبين الشمس لا يحتوى تقريبا على أية جزيئات . وبناء على ذلك فإن الانتقال الاهتزازى بالتوصيل أو الانتقال الدورانى بالحمل مستحيلان . ومن ثم فإن هذه الحالة هى حالة انتقال للحرارة خلال الفراغ ، أى خلال العدم . وتسمى هذه الطريقة لانتقال الحرارة بالإشعاع .

الإشعاع
الحرارى

لم يستطع معظم العلماء لسنوات طويلة ، وحتى العقد الأول من هذا القرن ، أن يتصوروا أن الحرارة والضوء ينتقلان من الشمس خلال لا شئ . لذلك افترض هؤلاء العلماء أن الفراغ كله مملوء « بالأثير الوضاء (أى الناقل للضوء) » . وظل مفهوم الأثير الميكانيكى سائدا إلى أن أثبت اينشتين (فى عام ١٩٠٥) أنه غير ذى فائدة كما أنه لا يمكن إثبات وجوده ، وبالتالي نبذ هذا المفهوم نهائيا . وحتى قبل ذلك واجه مفهوم الأثير صعوبات هائلة لم يستطع أن يتغلب عليها مما زعزع الثقة فيه . وفى الوقت الحاضر لا يعتبر مفهوم الأثير ضروريا أو مناسبا ، وسوف نرى فى دراستنا للإشعاع الكهرومغناطيسى أن فهم طبيعة الإشعاع يمكن أن يتحقق بدونه .

وكما ألمحنا سابقا ، هناك علاقة مباشرة بين الإشعاع الحرارى والإشعاع الضوئى والإشعاع الكهرومغناطيسى (إشعاع الراديو) . وسوف نرى فى فصول تالية أن هذه الظواهر فى الحقيقة واحدة .

١١ - ١٢ قوانين التبريد

اثبت نيوتن أن تبريد المواد غير الساخنة جدا يتبع قانونا مناسباً وبسيطاً . وقد وجد نيوتن بالتجربة أنه إذا كانت T_1 درجة حرارة الجسم و T_0 درجة حرارة الوسط المحيط ، فإن كمية الحرارة ΔQ المفقودة بواسطة الجسم في زمن قدره t تعطى بالعلاقة

$$\Delta Q = (\text{const})(T_1 - T_0)t \quad (١١ - ٥)$$

قانون نيوتن
للتبريد

وهذه العلاقة تسمى قانون نيوتن للتبريد . ونحن نعلم الآن أن هذا القانون صحيح تقريبا فقط في حالة ما إذا كان الفرق بين درجتى الحرارة $T_1 - T_0$ صغيرا فقط . ويمثل هذا القانون التأثيرات المشتركة للتوصيل والحمل والإشعاع .

وقد أثبت في حالة فقدان الحرارة بالإشعاع فقط ، تجريبيا أولا ثم نظريا بعد ذلك ، أن كمية الحرارة التى يشعها الجسم الساخن تعطى بالمعادلة :

$$\Delta Q = (\text{const})(T_1^4 - T_0^4)t \quad (١١ - ٦)$$

قانون ستيفان

وتعرف هذه العلاقة باسم قانون ستيفان . ويراعى عند استخدام هذا القانون أن تكون درجة حرارة الجسم الساخن T_1 ودرجة حرارة الجسم المحيط T_0 مقاستين بالدرجات المطلقة . وإذا كان الفرق بين درجتى الحرارة صغيرا فإن قانون ستيفان سوف يؤول إلى قانون نيوتن للتبريد .*

بالإضافة إلى ذلك ، أمكن إثبات أن الجسم الأسود (أى الجسم الذى لا يعكس الضوء) يشع كمية من الحرارة أكبر من الجسم ذى الانعكاسية العالية . وكقاعدة عامة يمكننا القول أن الممتص الحرارى الجيد يشع حرارى جيد .

١١ - ١٣ الرطوبة

يعلم كل منا أن الهواء يحتوى على كمية كبيرة من بخار الماء فى اليوم الذى تكون فيه الرطوبة عالية . والرطوبة مقياس للمحتوى المائى للهواء . وعلى وجه الدقة ، تعرف الرطوبة النسبية (RH) بأنها النسبة بين كتلة بخار الماء لوحدة الحجم فى الهواء وكتلة بخار الماء التى تسبب تشبع وحدة الحجم عند نفس درجة الحرارة . وكما وضعنا من قبل فى هذا الفصل ، عندما يكون البخار المشبع متلامسا مع السائل ، فإن عدد الجزيئات التى تترك سطح السائل فى زمن معين تساوى عدد

* تركنا للطالب إثبات صحة ذلك . كتمهن . لتحقيق ذلك يجب أن تعلم أنه إذا كانت $T_1 \approx T_0$ ، فإن $T_1^4 - T_0^4 = (T_1^2 - T_0^2)(T_1^2 + T_0^2) \approx 2T_0^2(T_1^2 - T_0^2)$

الجزئيات التي تعود إليه. إذن ، عند التشبع لا يحدث أى نقص أو زيادة في التبخير . وإذا كان البخار أكثر من مشبع ، أى زائد التشبع تتكثف القطرات من البخار وينتج عن ذلك تكون الضباب أو المطر .

وحيث أن ضغط الغاز المثالي يتناسب مع عدد الجزيئات ، يصاغ تعريف الرطوبة النسبية عادة بدلالة الضغوط وليس الكتل . ونظر لأن بخار الماء قريب جدا من الغاز المثالي ، فإن التعريفين متماثلان تقريبا . وفي صورة معادلة يمكننا وضع هذا التعريف كالتالى :

$$(٧ - ١١) \quad \text{الرطوبة النسبية} = \frac{m}{m_s} \approx \frac{P}{P_s}$$

حيث P, m هما كتلة وحدة الحجم وضغط بخار الماء في الهواء ، m_s, P_s هما نفس هاتين الكميتين للبخار المشبع . ويوضح الجدول ١١ - ٧ بعضا من بيانات بخار الماء المشبع عند درجات حرارة مختلفة .

طبقا للجدول ١١ - ٧ ، يحتوى الهواء المشبع عند درجة 68°F على 17.1 g/m^3 من الماء . لنفرض أن الهواء يحتوى بالفعل على 17.1 g/m^3 من بخار الماء . فإذا كانت درجة حرارة الهواء فوق 68°F ، فإن الهواء يمكن أن يحتوى كمية أكبر من البخار . أما إذا كانت نفس الكمية من بخار الماء موجودة ثم برد الهواء تحت 68°F (كما يحدث عند غياب الشمس مثلا) ، فإنه سوف يصبح فوق مشبع بمجرد أن تنخفض درجة الحرارة تحت 68°F . وعند درجة الحرارة المذكورة وما تحتها تبدأ القطرات في السقوط من الهواء على هيئة ضباب أو ندى أو مطر . وتسمى درجة الحرارة التي يصبح الهواء عندها مشبعا بالكاد نقطة الندى .

تعريف
نقطة الندى

ونقطة الندى للهواء كمية نافعة جدا . لنفرض أن درجة حرارة الهواء في يوم معين كانت 89.6°F . وفي هذا اليوم قام إرصادى في مكتب الأحوال الجوية بتبريد بعض الهواء حتى بدأ الندى أو الضباب الترسب فيه . لنفرض أن الإرصادى قد وجد أن نقطة الندى هي 60.8°F . وبالإستعانة بالجدول ١١ - ٧ استطاع هذا الرجل أن يعلم أن الهواء يحتوى على 13.50 g/m^3 من بخار الماء ، لأن هذه هي قيمة ضغط بخار الماء المشبع عند درجة 60.8°F . وحيث أن درجة الحرارة الفعلية للهواء 89.6°F فإن الهواء المشبع عند هذه الدرجة يجب أن يحمل 33.45 g/m^3 من الماء (انظر الجدول) . وبحساب الرطوبة النسبية باستعمال هاتين القيمتين ، وجد الإرصادى أن الرطوبة النسبية تساوى :

$$RH = \frac{m}{m_s} = \frac{13.50}{33.45} \approx 0.40$$

جدول ١١ - ٧
خواص بخار الماء المشبع

T_s °C	T_s °F	m_s g/m ³	P_s cm Hg
-8	+17.6	2.74	0.23
-4	24.8	3.66	0.33
0	32.0	4.84	0.46
4	39.2	6.33	0.61
8	46.4	8.21	0.80
12	53.6	10.57	1.05
16	60.8	13.50	1.36
20	68.0	17.12	1.75
24	75.2	21.54	2.23
28	82.4	26.93	2.82
32	89.6	33.45	3.55
36	96.8	41.82	4.44

وعادة تضرب هذه الاجابة في 100 ونقول أن الرطوبة هي 40% .

يمكن قياس الرطوبة النسبية بطرق أخرى غير تعيين نقطة الندى . وتعتمد إحدى الطرق الشائعة ، وهي طريقة البصيلة المخضلة والبصيلة الجافة ، على أساس أن السوائل تسبب تأثيرا تبريديا عندما تتبخر (نتيجة لامتصاص حرارة التبخير) وأن التبخير يتوقف عندما يكون البخار مشبعا ، ومن ثم إذا قورنت قراءة ترمومتر جاف بقراءة ترمومتر موضوع حول بصيلته قطعة مبللة من القماش ، فإن قراءة الترمومتر ذى البصيلة المبللة تكون دائما أقل من قراءة الترمومتر ذى البصيلة الجافة . والفرق بين القراءتين مقياس مباشر للرطوبة النسبية ، فكلما كانت الرطوبة النسبية منخفضة ، كلما كان الفرق بين قراءتي الترمومتريين كبيرا . وقد جهزت جداول خاصة تربط الرطوبة النسبية بهذا الفرق بين درجتى الحرارة بحيث يحتاج الشخص فقط إلى قراءة الترمومتريين لكي يمكنه تعيين الرطوبة النسبية .

وتسبب الرطوبة النسبية العالية في الصيف ضيقا شديدا لنا ، وهذا راجع لأننا نعرق في الصيف وأن تبخر العرق يبرد سطح الجلد . فإذا كانت الرطوبة النسبية 100% فلن يحدث أي تبخر للعرق ، وبالتالي لن يحدث أي تبريد لسطح الجلد . وهذا هو السبب في أن إحساسنا بالحرارة أقل في المناخ الجاف منه في المناخ الرطب .

ملخص

عند رفع درجة حرارة الجسم تزداد طاقته الداخلية . الطاقة الداخلية U للجسم هي الطاقة الكلية الكامنة في الجسم . تحتوى هذه الطاقة على طاقة الحركة ، والطاقة الاهتزازية والكيميائية والنوية وجميع الصور الأخرى من الطاقة التي تملكها الجسيمات التي تكون الجسم . الطاقة التي تنقل من جسم درجة حرارته عالية إلى آخر درجة حرارته منخفضة بسبب الفرق بين درجتى الحرارة تسمى الطاقة الحرارية . تمثل الطاقة الحرارية بالكمية ΔQ . تناسب الطاقة الحرارية تلقائيا من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة وليس العكس .

الوحدات المستخدمة عادة لقياس الطاقة الحرارية هي السعر و Btu (و . ج . ب) . ترتبط هاتان الوحدتان بالجول بالعلاقين $1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$ و $1 \text{ Btu} = 1054 \text{ J}$. علاوة على ذلك $1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal}$. يستخدم المتخصصون في التغذية السعر الكبير (كيلوكالورى) وهو يسمى أيضا السعر .

من التعريف ، السعة الحرارية النوعية لمادة c هي الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتلة من المادة درجة واحدة . وفي صورة معادلة ، $Q = cm \Delta T$ حيث ΔQ كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كتلة من المادة قدرها m بمقدار ΔT .

عند التعامل مع الغازات تعطى عادة حارتان نوعيتان . تستخدم السعة الحرارية النوعية c_v عندما يحدث تغير درجة الحرارة عند ثبوت الحجم . وتستخدم الكمية c_p عندما يكون الضغط ثابتا . c_p أكبر دائما من c_v لأن كمية من الطاقة الحرارية تستهلك في بذل الشغل الناتج من زيادة الحجم في حالة ثبوت الضغط .

الطاقة اللازمة لتبخير وحدة الكتلة من مادة تسمى حرارة التبخير H_v . تنطلق نفس الكمية من الحرارة عند تكثف وحدة الكتلة من البخار . بالمثل ، الطاقة اللازمة لصهر وحدة الكتلة من المادة المتبلورة هي حرارة الانصهار H_f . تنطلق كمية مساوية من الحرارة عند تبلور وحدة الكتلة من حالة الانصهار .

عندما يوجد السائل متلامسا مع بخاره عند درجة حرارة ثابتة فإن ضغط توازن البخار يسمى ضغط البخار المشبع ، وتزداد قيمته مع درجة الحرارة . عند ارتفاع درجة حرارة السائل يزداد ضغط البخار المشبع حتى يتساوى عند درجة حرارة عالية معينة مع الضغط الخارجى على السائل . وعند هذه الدرجة تتكون فقاعات البخار وتنمو في السائل . ويقال عندئذ أن السائل يغلى .

إذا تغيرت درجة حرارة جسم طوله الأصلي L بمقدار ΔT فإن الطول سوف يتغير بمقدار ΔL يعطى بالعلاقة $\Delta L/L = \alpha \Delta T$. الكمية α هي معامل التمدد الحرارى الطولى . بالمثل ، إذا تغيرت درجة حرارة جسم حجمه الابتدائى V بمقدار ΔT فإن ΔV حجم سوف يتغير بمقدار ΔV . يعرف معامل التمدد الحرارى الحجمى γ بالعلاقة $\Delta V/V = \gamma \Delta T$.

يمكن أن تنتقل الحرارة بثلاثة طرق . في حالة التوصيل ، تنتقل الطاقة من ذرة إلى أخرى (أو من جسيم إلى آخر) بالتصادم . وحركة الجسيمات ليست بعيدة المدى . أما في حالة الحمل فإن الجزيئات ذات الطاقة العالية تنساب على هيئة تيار وتحمل الطاقة الحرارية معها . وتتحرك الجسيمات عندئذ مسافات طويلة تقارن بالمسافات التي تنتقل الحرارة خلالها . وفي الإشعاع تنتقل الحرارة خلال الفراغ . وهذه هي الطريقة التي تنتقل بها الطاقة في الضوء أو موجات الراديو .

الرطوبة النسبية هي النسبة بين كتلة بخار الماء لوحدة الحجم في الهواء وكتلة بخار الماء لوحدة الحجم اللازمة للتشبع عند نفس درجة الحرارة . يستطيع الهواء حمل كمية أكبر من البخار في وحدة الحجم عند درجة الحرارة العالية عنها في درجة الحرارة المنخفضة . عند تبريد الهواء بدرجة كافية يمكن الوصول إلى درجة حرارة يصبح فيها البخار مشبعا . تسمى هذه الدرجة نقطة الندى . يتكون نوع من الترسب عند درجات الحرارة المنخفضة عن نقطة الندى .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية :

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

- ١ - التفرقة بين المصطلحات : الطاقة الحرارية (Thermal energy) ، والطاقة الداخلية ، والطاقة الحرارية (Heat energy) بشرح معنى كل منها .
- ٢ - ذكر اتجاه سريان الحرارة عندما يتلامس جسمان معلوم درجة حرارتهما .
- ٣ - ذكر معنى وحدات السعر و Btu (أ) بالإشارة إلى قيمتهما بالجول ، (ب) بالإشارة إلى الطاقة الحرارية اللازمة لتسخين الماء . شرح العلاقة بين السعر والسعر الكبير .
- ٤ - تعريف السعة الحرارية النوعية بالألفاظ وفي صورة معادلة . ذكر قيمتها للماء .
- ٥ - استخدام المعادلة $\Delta Q = cm \Delta T$ لحل المسائل البسيطة المتعلقة بتسخين وتبريد الأجسام .
- ٦ - شرح لماذا يجب أن تكون c أكبر للمادة المكونة من جزيئات معقدة منها للغاز أحادي الذرة .
- ٧ - شرح لماذا تختلف c_v عن c_p للغاز .
- ٨ - تعريف المصطلحات التالية وذكر العلاقة بينها : ضغط البخار المشبع ، درجة الغليان ، حرارة التبخير ، التبخر ، التبريد نتيجة للتبخر .
- ٩ - وصف كيفية تغير درجة حرارة مادة متبلورة كدالة في الزمن عند تسخينها ببطء إلى درجة الغليان وانصهارها وتسخينها فوق هذه الدرجة ثم تبخيرها مع توضيح تأثيرات حرارة الانصهار وحرارة التبخير .
- ١٠ - وصف ما يحدث لدرجة غليان سائل عندما يتغير الضغط الخارجى فوقه .
- ١١ - حل المسائل البسيطة المتعلقة بقياس كمية الحرارة التى تمثّل الأمثلة التوضيحية من ١١ - ٤ إلى ١١ - ٧ .
- ١٢ - حساب التمدد الحرارى الطولى لقضيب أو الحجمى عندما يكون معامل التمدد الحرارى المناسب معلوماً أو حساب معامل التمدد الحرارى بمعلومية نتائج تجربة تمدد .
- ١٣ - تعيين كمية الحرارة المنتقلة خلال بلاطة من المادة عندما تكون درجة حرارة كل من وجهيها معلومة . افترض أن الموصلية الحرارية للمادة معلومة .
- ١٤ - ذكر الطرق الثلاث التى تنتقل بها الحرارة وشرح كل منها .
- ١٥ - تعريف الرطوبة النسبية ونقطة الندى . حساب RH عندما تكون نقطة الندى (أو تركيز بخار الماء) ودرجة حرارة الهواء معلومتين افترض أن لديك جدولاً كالجدول ١١ - ٧ . اشرح لماذا تعتبر RH عاملاً في تبريد الجسم بالتبخير أو العرق .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتي :

طاقة داخلية U

الطاقة الحرارية ΔQ

السعة الحرارية النوعية c

$\Delta Q = cm \Delta T$

السعر ، Btu ، السعر الكبير

c_p أكبر من c_v

ضغط البخار المشبع

التبخير والغليان
حرارة التبخر وحرارة الانصهار
الغليان تحت ضغط منخفض

$$\Delta V/V = \gamma \Delta T \quad \text{و} \quad \Delta L/L = \alpha \Delta T$$

التوصيل الحرارى ، الحمل الحرارى ، الإشعاع الحرارى
قانون نيوتن للتبريد
الرطوبة النسبية
نقطة الندى
بخار فوق مشبع

اسئلة وتمهينات :

- ١ - بالرغم من أن جزيئات غاز الأرجون (Ar) وجزيئات غاز الأكسجين (O₂) لهما تقريبا نفس الكتلة الجزيئية ، فإن الطاقة اللازمة لتسخين الأكسجين ضعف الطاقة اللازمة لتسخين الأرجون تقريبا . اشرح على أساس الطاقة الداخلية للغازين لماذا تعتبر هذه النتيجة متوقعة .
- ٢ - فى احدى التجارب العملية أعطى طالب ابريق ترموس يحتوى على مادة مجهولة درجة حرارتها T_1 ، ثم أضيفت كمية من الحرارة ΔQ بإضافة الماء الساخن اليها . وبعد أن تحقق التوازن وجد أن درجة الحرارة لازالت T_1 ، فاستنتج الطالب أن الحرارة النوعية للمادة الموجودة فى دورق الترموس لانتهائية . اشرح لماذا تقتضى التجربة أن تكون $c = \infty$. ماهو التفسير المحتمل لهذه النتائج العملية ؟
- ٣ - هل يمكن أن تضاف الحرارة إلى شيء ما بدون أن تتغير درجة حرارته ؟ ماذا إذا كان هذا « الشيء » غازا ، سائلا أو جامدا ؟ اشرح .
- ٤ - اشرح لماذا تكون c_p للغاز أكبر من c_v .
- ٥ - ينصهر نوع معين من الشمع عند درجة 60°C . صف تجربة لتعيين حرارة انصهار الشمع .
- ٦ - كيف يمكن حساب الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مخلوط من وزنين معلومين لغازين بمقدار 10°C ؟
- ٧ - يمكن جعل الماء يغلى بشدة بتبريد قارورة من الماء لحمت عندما كان الماء يغلى عند درجة 100°C اشرح لماذا ؟
- ٨ - يغلى الكلور السائل عند درجة 30°C تحت ضغط قدره 8.60 atm . أين يوجد مثل هذا النوع من البيانات ؟ كن محددا .
- ٩ - فى أية وجوه تختلف الأرض إذا كان الماء ينكمش عند التجمد ؟
- ١٠ - لماذا يجب أن يبرد الغاز أكثر عندما تتمدد بمقدار ΔV بدفع كباس إلى الخارج منه فى حالة ماإذا تمدد الغاز فى غرفة تفريغ حجمها ΔV ؟
- ١١ - لماذا نحس بأن قطعة من الصلب أبرد من قطعة من الخشب عند نفس درجة الحرارة ؟
- ١٢ - ماذا يحدث إذا كانت الأرض مغطاة بطبقة كثيفة من الضباب المحمل بالدخان بحيث لا تستطيع أشعة الشمس أن تصل إلى سطحها ؟
- ١٣ - قدر الارتفاع فى درجة حرارة الجسم البشرى فى 1 day إذا احتفظ بالطاقة الحرارية التى يحصل عليها من الغذاء فى يوم واحد وقلدها 2000 سعر كبير (كيلوكالورى) تقريبا . قيمة c للشخص تساوى حوالى $0.83 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}$. (ق)
- ١٤ - من المعروف أن الغرفة المليئة بالناس تصبح حارة جدا مالم تهو بطريقة مناسبة . بفرض أن الشخص يطلق كمية من الحرارة تكافئ طاقة الغذاء بطريقة منتظمة خلال اليوم ، قدر الارتفاع فى درجة حرارة فصيلك فى 1 h إذا لم يكن هناك أى فقدان للطاقة من الفصيل . (ق)

- ١٥ - ماهى كمية الماء بالتقريب التى يجب أن تبخر من سطح جلد رجل متوسط الحجم لكى يبرد جسمه بمقدار 1°C ؟ إلى أى مدى تتفق هذه النتيجة مع ما سمعته عن تأثير العرق على الجسم ؟ $[C_{\text{body}} \approx 0.83 \text{ cal/(g)}(^{\circ}\text{C})]$. (ق)
- ١٦ - إذا تعرض الثلج لضغط كبير فإن نقطة تجمده تنخفض عن 0°C . وبطريقة تقريبية ، تنخفض نقطة الانصهار حوالى 5°C لكل زيادة فى الضغط المطبق قدرها 6000 N/cm^2 . قدر نقطة انصهار الثلج تحت مزججة المتزحلق . (ق)

مسائل :

- ١ - (أ) ماعدد السعرات من الحرارة اللازمة لتغير درجة حرارة 10 g من الرصاص من 20°C إلى 100°C ؟ (ب) وماعدد الوحدات الحرارية البريطانية Btu التى تكافئ هذه السعرات ؟
- ٢ - (أ) إذا بردت 20 g من النحاس من 80°C إلى 30°C ، فما عدد السعرات من الحرارة المنطلقة نتيجة لذلك ؟ (ب) وماعدد الوحدات الحرارية البريطانية Btu التى تكافئ هذه السعرات ؟
- ٣ - (أ) ماعدد الوحدات الحرارية البريطانية Btu اللازمة لتسخين 3.0 lb من الرصاص من 70°F إلى درجة الانصهار وهى حوالى 590°F ؟ (ب) ماعدد السعرات التى تكافئ هذه الوحدات الحرارية البريطانية ؟
- ٤ - يستهلك شخص كتلته 70 kg حوالى 2500 سعرا كبيرا ، أى حوالى $2.5 \times 10^6 \text{ cal}$ ، من الغذاء يوميا . إذا تحولت هذه الطاقة الغذائية بأكملها إلى حرارة بدون فقد أى جزء ولو ضئيل منها ، فما مقدار الإرتفاع فى درجة حرارة جسم هذا الشخص ؟
- ٥ - يجلس خمسون شخصا فى غرفة مستطيلة أبعادها $3.5 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$. وفى المتوسط يستهلك كل شخص يوميا 2500 سعرا كبيرا ويفقد $\frac{1}{24}$ من هذه الكمية فى كل ساعة . مامقدار الإرتفاع فى درجة حرارة الغرفة فى 1 h نتيجة لهذه الطاقة الحرارية ؟ افترض للتبسيط أن الهواء يتكون من النتروجين N_2 وأن كثافته 1.29 kg/m^3 . أهمل الحجم الذى يشغله الناس . افترض أن الهواء راكد وأن الحرارة لا تفقد عن طريق الجدران أو النوافذ وأن حجم الهواء ثابت .
- ٦ - ماعدد السعرات من الحرارة اللازمة لتحويل 30 g من الثلج عند 5°C — إلى ماء درجة حرارته 20°C ؟
- ٧ - ماهى كمية الثلج ذات درجة الحرارة 0°C اللازمة لتبريد 250 g من الماء من درجة 25°C إلى 0°C ؟
- ٨ - أسقط مكعب من الثلج (درجة حرارته 0°C) كتلته 18 g فى كوب يحتوى على 150 g من الكوكا (Coke) درجة حرارتها 25°C . ماهى درجة الحرارة النهائية للكوكا بعد انصهار الثلج بفرض ان التبادل الحرارى مع الكوب مهمل ؟
- ٩ - صبت كمية من الرصاص المنصهر كتلتها 40 g ودرجة حرارتها 327°C فى تجويف بقبالب من الثلج . ماهى كمية الثلج المنصهرة ؟ افترض تحقق توازن درجة الحرارة مع قالب الثلج .
- ١٠ - ماهى كمية العرق التى يجب أن تبخر من جسم طفل كتلته 50 kg لكى تنخفض درجة حرارته بمقدار 2°C ؟ حرارة تبخير الماء عند درجة حرارة الجسم تساوى 580 cal/g تقريبا .
- ١١ - متوسط الطاقة التى تصل إلينا من الشمس فى الثانية هو 0.134 J/cm^2 ، وتمتص معظم هذه الطاقة أثناء مرورها فى الغلاف الجوى للأرض . افترض أن 0.1% من هذه الكمية تصل إلى سطح بحيرة وتستهلك فى تبخير مائها . ماهى كمية الماء المتبخرة من 1 m^2 من السطح فى يوم واحد ؟ استخدم $H_v = 590 \text{ cal/g}$.
- ١٢ - عندما يتبخر سائل طيار كالكحول أو الاثير من جلدك يحدث تبريد محسوس . افترض أن 0.020 g من ثانى كلوريد الإيثان ($H_v \approx 85 \text{ cal/g}$) قد تبخر من مساحة قدرها 1 cm^2 من جلدك فبرد طبقة سطحية سمكها 0.035 cm . (أ) مامقدار الانخفاض فى درجة الحرارة ؟ افترض أن c للجلد تساوى $0.75 \text{ cal/(g)}(^{\circ}\text{C})$ وأن كثافته 0.95 g/cm^3 . أهمل إمكانية حدوث تغير فى طور الجلد . اعتبر أيضا أن قيمة c لثانى كلوريد الإيثان صغيرة جدا ويمكن أهملها . (ب) لماذا لا تقل درجة حرارة الجلد بنفس المقدار المحسوب ؟

١٣ - أثبتنا سابقا أن $c_p - c_v = R/M$ في حالة الغاز المثالي . لحسب الكمية $(c_p - c_v)M$ لكل من الغازات الحقيقية المدرجة في الجدول ١١ - ٢ باستخدام البيانات المعطاه في هذا الجدول . للمقارنة $R = 8314 \text{ J/(kg mol)(K)}$. قيم M للغازات (بنفس الترتيب كما في الجدول ، هي 4.0 ، 32 ، 28 ، 44 ، 18 ، 16 .

١٤* - حبس غاز في أسطوانة رأسية بواسطة كباس وزنه 10 N كما هو مبين في الشكل ١١ - ٣ . وعندما كان النظام في درجة 20°C استقر الكباس ساكنا على ارتفاع معين في الأسطوانة . وبعد التسخين إلى درجة 100°C ارتفع الكباس 20 cm . بأي مقدار تزيد كمية الحرارة اللازمة لتسخين الغاز في الوعاء من 20°C إلى 100°C تحت ضغط ثابت عنها تحت حجم ثابت ؟ افترض أن الغاز مثالي .

١٥ - اسقطت قطعة من الرصاص كتلتها 100 g ودرجة حرارتها 100°C في مسعر من النحاس كتلته 50 g يحتوي على 50 g من الماء عند درجة 20°C . ماهي درجة الحرارة النهائية ؟

١٦ - اسقط 20 g من الثلج درجة حرارتها -10°C في مسعر من النحاس يحتوي على 100 g من الماء عند درجة 35°C . ماهي درجة الحرارة النهائية ؟

١٧ - ماهي كمية بخار الماء (ودرجة حرارته 100°C) اللازمة لتحويل 40 g من الثلج درجة حرارته عند -10°C إلى ماء درجة حرارته 30°C إذا كان الثلج موجودا في مسعر من النحاس كتلته 50 g ؟

١٨ - مسعر من النحاس $[c = 0.20 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}]$ كتلته 70 g يحتوي على 400 g من الماء و 100 g من الثلج في حالة توازن حراري . أضيف إلى محتويات المسعر قطعة ساخنة من المعدن $[c = 0.10 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}]$ كتلتها 300 g ودرجة حرارتها مجهولة ، وكانت درجة الحرارة النهائية 10°C . ماهي درجة الحرارة الابتدائية للمعدن .

١٩ - مسعر نحاسي مكافئه المائي 5.9 g ، أي أن المسعر يتصرف أثناء التبادل الحراري ككمية من الماء كتلتها 5.9 g . يحتوي هذا المسعر على 40 g من الزيت درجة حرارتها 50°C . وعندما أسقطت 100 g من الرصاص درجة حرارتها 30.0°C . أصبحت درجة حرارته النهائية 48.0°C . ماهي السعة الحرارية النوعية للزيت ؟

٢٠ - يغلي البنزين عند حوالي 80°C . نمر بخار بنزين درجة حرارته 80°C في مسعر مكافئه المائي 20 g (انظر المسألة ١٩) يحتوي على 100 g من الزيت $[c = 0.50 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}]$ درجة حرارته 20°C . وبعد أن تكثفت 7.0 g من البنزين أصبحت درجة الحرارة النهائية 30°C . ماقيمة حرارة تبخير البنزين ؟ c للبنزين تساوي $[0.40 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}]$.

٢١ - اضيف 150 g من الثلج درجة حرارته 0°C إلى 200 g من الماء في فنجان من الألمنيوم كتلته 100 g ، وكانت درجة حرارة الفنجان والماء 30°C . ماهي درجة الحرارة النهائية ؟

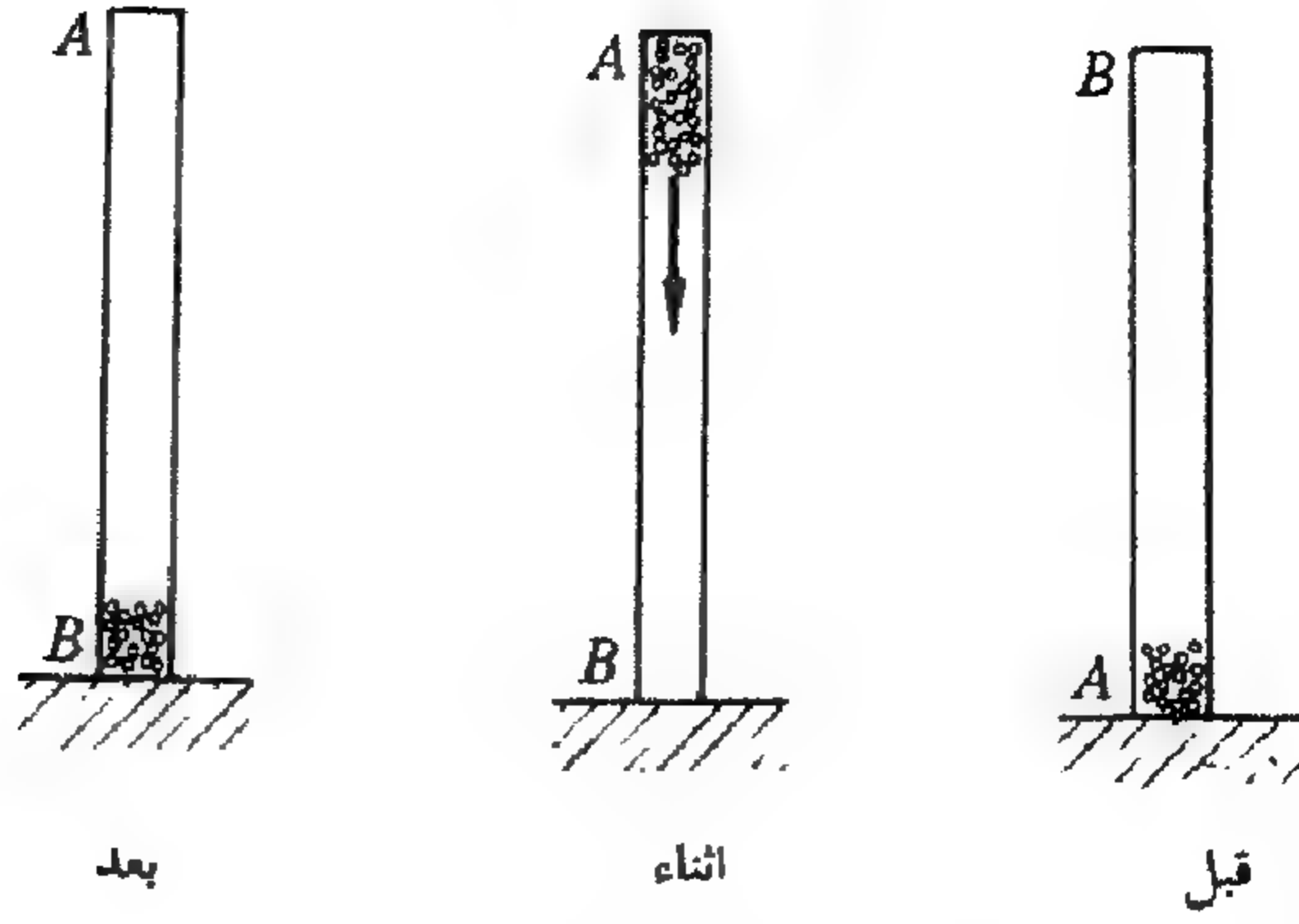
٢٢ - رصاصه معينة كتلتها 6.0 g ونقطة انصهارها 300°C وسعتها الحرارية النوعية $(0.20 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)})$ وحرارة انصهارها 15 cal/g . (أ) ماهي كمية الحرارة اللازمة لصهر هذه الرصاصه إذا كانت درجة حرارتها الابتدائية 0°C ؟ (ب) ماهي أقل سرعة يمكن أن تسير بها الرصاصه إذا اريد أن تنصهر بمجرد إيقافها ؟

٢٣* - تستقر كتلة قدرها m من خردق الرصاص في قاع أسطوانة من الكرتون طولها L وحدة ، كما هو مبين في الشكل م ١١ - ١ . وعندما تقلب الأسطوانة رأسا على عقب بسرعة فإن الخردق يسقط فيها إلى القاعدة الجديدة . اثبت أن الارتفاع في درجة حرارة الخردق بعد قلب الأسطوانة n مرة يعطى بالعلاقة :

$$\Delta T = \frac{ngL}{c_{\text{Pb}}J}$$

حيث J المكافئ الميكانيكي للحرارة ، أي عدد الجولات التي تكافئ 1 cal ، g تسارع الجاذبية .

٢٤ - طريق مستقيم مصنوع من ألواح خرسانية موضوعة طرفا لطرف ، وطول كل لوح 25 m . ماهو عرض فجوة التمدد بين كل لوحين عند درجة 20°C إذا كانا متلامسين عند درجة 45°C ؟



- ٢٥ - وضعت العلامات على شريط قياس من الألمنيوم عندما كانت درجة الحرارة 25°C : ما هو الخطأ المئوي الناتج من الانكماش إذا استخدمت المسطرة في درجة 5°C ؟
- ٢٦ - برطمان سلاطة ذو غطاء من الألمنيوم من النوع الملولب . وعند درجة 20°C يكون الغطاء محكما بحيث لا يمكن فتحه . بأي كسر يجب أن يتمدد قطر الغطاء إذا سخن إلى درجة 85°C تحت صنبور للماء الساخن ؟ لماذا لا يجب أن يسخن الغطاء أطول من اللازم ؟
- ٢٧ - تستخدم طريقة «توافق الإنكماش» في الورش الميكانيكية على نطاق واسع لترتيب القضبان الأسطوانية في ثقوب بالعجلات والقوالب والألواح . لنفرض أننا نريد تركيب قضيب قطره 2.000 cm في فتحة قطرها 1.985 cm في قالب من النحاس الأصفر . إلى أي درجة حرارة يجب تسخين القالب بحيث يتوافق القضيب مع الفتحة ؟
- ٢٨ - قارورة من الزجاج المقاوم للحرارة مدرجة لتحمل 100 cm^3 تماماً في درجة 20°C ما هو الحجم الذي تحمله عند درجة 30°C ؟ تلميح : تتمدد القارورة المخوفة كما لو كانت مصمتة تماماً .
- ٢٩ - ملأت قارورة حجمية سعتها 100 cm^3 بالبنزين في درجة 30°C . ما هي كمية البنزين الواجب اضافتها لكي تمتلأ تماماً إذا بردت القارورة إلى درجة 20°C ؟ (اهمل تمدد القارورة) .
- ٣٠ - عمود حديدى طوله 10 ft مدفون طرفاه في قائمين من الخرسانة . فإذا كانت درجة الحرارة عند تجهيز هذا الهيكل هي 35°F ، فما هي القوة التي يؤثر بها العمود على القائمين عندما تكون درجة حرارته 98°F ؟ مساحة مقطع القائم 10 in^2
- ٣١ - لحمت فوهة قارورة زئبق عند درجة 20°C بحيث كانت مملوءة تماماً بالزئبق اوجد الضغط داخل القارورة عند درجة 100°C . امل تمد الزجاج $k_{\text{Hg}} = 2.5 \times 10^{-6}\text{ in}^2/\text{lb}$.
- ٣٢ - اثبت أن معامل التمدد الحجمي في حالة الغاز المثالي يساوي $1/T$ بشرط حدوث التمدد عند ثبوت الضغط .
- ٣٣ - وضع أحد طرفي قضيب من النحاس الأصفر طوله 0.50 m ونصف قطره 0.5 cm في درجة حرارة 100°C ووضع الآخر في درجة 20°C ، ما هي كمية الحرارة التي تسرى في القضيب في زمن قدره 1 s ؟ افترض أن جوانب القضيب معزولة .
- ٣٤ - استخدام لوح من الاسيستوس سمكه 2.0 mm كفاصل بين لوحين من النحاس الأصفر درجة حرارة احدهما 100°C ودرجة حرارة الآخر 20°C . ما هي كمية الحرارة المارة خلال مساحة قدر 40 cm^2 من أحد اللوحين إلى الآخر في 1 h ؟
- ٣٥ - تحمل ماسورة من النحاس الأصفر سمكها 0.25 cm وقطرها 10 cm بخار ماء درجة حرارته 100°C إلى راقود للماء الدائر درجة حرارته 20°C . ما هي كمية الحرارة المفقودة لكل متر من الماسورة في الثانية ؟
- ٣٦ - وضعت شريحة من المطاط سمكها 0.10 cm بين لوحين من النحاس الأصفر سمك كل منها 0.50 cm . وحفظ السطح الخارجى لأحد اللوحين في درجة 0°C ، بينما حفظ السطح الخارجى للآخر في درجة 100°C . اوجد درجتى حرارة سطحي شريحة المطاط .
- ٣٧ - إثبت أن قانون ستيفان للتبريد يؤول إلى قانون نيوتن للتبريد إذا كان $(T_1 - T_0)/T_0 \ll 1$

- ٣٨* - غرفة مغلقة حجمها 500 m^3 ودرجة الحرارة فيها 24°C . والرطوبة داخلها 95% شغل مزيل الرطوبة في هذه الغرفة لتقليل الرطوبة فيها . بفرض عدم تغير درجة الحرارة ، ماهى كتلة الماء الواجب إزالته لكي تنخفض الرطوبة إلى 40% ؟
- ٣٩ - وجد في أحد الأيام أن الماء يتكثف على كوب ماء عندما تكون درجة حرارة الماء فيه 16°C أو أقل . فإذا كانت درجة حرارة الغرفة 20°C ، اوجد (أ) كمية الماء في وحدة الحجم من الهواء ، (ب) الرطوبة النسبية .
- ٤٠ - إذا كانت درجة حرارة الهواء 90°F والرطوبة النسبية 80% ، فالى أى درجة يمكن تبريد زجاجة مشروب خفيف بحيث لا يتكثف الماء عليها ؟
- ٤١ - كان شخص يرتدى نظارة خارج منزله لفترة ما في يوم كانت درجة حرارة الهواء فيه -4°C . ماهى أقل قيمة للرطوبة النسبية RH في المنزل بحيث لا يتكون الضباب على زجاج النظارة ؟ افترض أن درجة حرارة المنزل 20°C .

الفصل الثاني عشر

الديناميكا الحرارية

قبل معرفة طبيعة الذرات والجزيئات بوقت طويل تمكن العلماء من استنباط طريقة فعالة ومناسبة لمناقشة الحرارة والشغل والطاقة الحرارية . وتتضمن هذه الطريقة وصف المادة بدلالة الخواص الإجمالية كالضغط ودرجة الحرارة والحجم وسريان الحرارة . وهذه الطريقة لوصف سلوك الأجسام والمواد تسمى الديناميكا الحرارية . وبالرغم من أننا نفهم جيدا كيفية سلوك الذرات والجزيئات ، فإن الديناميكا الحرارية تستخدم على نطاق واسع في جميع فروع العلم . وفي هذا الفصل سوف نعطي مقدمة عن هذا المجال الهام والفعال من مجالات الدراسة .

١٢ - ١ متغيرات الحالة

في الديناميكا الحرارية نناقش عادة سلوك مجموعة محددة من الجزيئات نسميها النظام . وقد يكون النظام هو جزيئات الغاز في وعاء ، والجزيئات في محلول ، كما قد يكون النظام معقدا كجزيئات شريط من المطاط . ولكي تكون المناقشة الدينامية الحرارية ذات معنى يجب أن يكون النظام محددًا تمامًا . وفي هذه الحالة فقط يمكننا أن نعطي وصفا واضحا له .

ولوصف النظام نستخدم كميات معينة تنطبق على نظام بأكمله أو على جزء محدد منه . فالضغط ودرجة الحرارة والحجم هي كميات نموذجية تستخدم على نطاق واسع في وصف النظام ويمكن قياسها بسهولة . وفي الديناميكا الحرارية نستخدم أيضا كميات أخرى كالطاقة الداخلية والحرارة والشغل و كمية أخرى سوف نقابلها فيما بعد تسمى الانتروبيا . وإذا تغيرت حالة النظام فإن هذه الكميات قد تتغير . ومن الضروري أن نعلم أى الكميات هي المناسبة لتمثيل الحالة الصحيحة للنظام . لنتعرف الآن على هذه الكميات .

عندما يصل غاز في وعاء إلى التوازن يصبح للغاز درجة حرارة وضغط وحجم معينين . ويعكس قانون الغاز المثالي هذه الحقيقة ، إذ أنه يخبرنا أن $PV = nRT$. وواضح من هذا القانون أنه إذا كان أى متغيرين من هذه المتغيرات الثلاثة معلومين ، فإن المتغير الثالث يمكن حسابه ، أى أنه يعتبر معلوما أيضا . ويسمى هذا الموقف المعين ، الذى يكون للغاز (النظام) فيه قيم محددة للمتغيرات P ، V ، T حالة النظام . ومتى عاد النظام إلى نفس هذه القيم للمتغيرات P ، V ، T ، فإن حالة النظام ستعود كما كانت أصلا . وبالرغم من أن كل جزيء في النظام قد لايفعل نفس الشيء كالجزيئات الأخرى ، فإن النظام يبدو متماثلا في القياسات الماكروسكوبية .

متغيرات الحالة

هناك سمات معينة للنظام لا تتغير أبدا عندما يكون النظام في حالة معينة ، وتسمى المتغيرات التى تصف هذه السمات متغيرات الحالة . فمثلا ، تعتبر المتغيرات P ، V ، T متغيرات حالة للنظام . وبصرف النظر عن الطريقة التى يصل بها النظام إلى حالة معينة ، تظل قيمة كل من الضغط والحجم ودرجة الحرارة ثابتة دائما . فمثلا ، يمكننا اعتبار الغاز الموجود في إطار السيارة كنظام . وفي هذه الحالة تكون قيم كل من P ، V ، T متماثلة في الحالات المتماثلة طالما لم يكن هناك أى تسرب للغاز من الإطار ، ولا يمثل تاريخ الغاز في الإطار أية أهمية في هذا الشأن . إذن ، تتميز كل حالة معينة من حالات النظام بنفس قيم متغيرات حالته P ، V ، T دائما .

رأينا مما سبق أن الضغط والحجم ودرجة الحرارة متغيرات حالة ، ولكن ليست جميع الكميات التى تصف النظام متغيرات حالة . فالشغل ، مثلا ، ليس متغير حالة ، إذ لا يمكن أن تنسب كمية محددة من الشغل للغاز الموجود فى إطار عجلة سيارة (أى النظام) . فعندما يصل الغاز فى اليوم التالى إلى نفس حالته اليوم لن يكون هناك أى تأكيد بأن الغاز لم يبذل أى شغل فى ذلك الوقت . ومن ثم فإن « محتوى شغل » الغاز كمية ليس لها معنى محدد تماما . إذن ، الشغل ليس متغير حالة .

بالمثل ، الحرارة ليست متغير حالة . فالغاز فى الإطار يمكن تسخينه بكثير من الطرق لا تتضمن جميعها سريان الحرارة إلى الغاز . وبالرغم من أن الشمس يمكن أن تزود الإطار بالحرارة وتؤدي إلى تسخينه ، فإن الفعل الميكانيكى أيضا يمكن أن يغير درجة حرارة الإطار . فمثلا ، إذا كانت السيارة تتحرك بسرعة كبيرة ، فإن إطارها يصبح ساخنا جدا حتى ولو كان الطقس باردا بدرجة كبيرة . نرى من ذلك أن درجة الحرارة لا تعرفنا بالضرورة ماهى كمية الحرارة التى انتقلت إلى الغاز لكى يصل إلى هذه الدرجة . وعليه فإن مصطلح « المحتوى الحرارى » للغاز ليس معنى محدد تماما . هذا لأن الحرارة تكون ذات معنى فقط إذا كانت الطاقة تنتقل نتيجة لفرق فى درجة الحرارة . إذن ، الحرارة ليست متغير حالة .

ناقشنا أيضا مفهوم الطاقة الداخلية لمادة ، ورأينا أنها تتكون من جميع أنواع الطاقة الكامنة فى المادة . وحيث أن الطاقة محفوظة ، يمكننا إعداد موازنة لها ، كما فى علوم المحاسبة التجارية . من هذا نرى أن الطاقة الداخلية للنظام كمية محددة تماما . لذلك إذا أخبرتنى ماهى الطاقة الداخلية لنظام ما اليوم ، يمكننى (من ناحية المبدأ على الأقل) أن أخبرك ماهى طاقته الداخلية فى وقت لاحق . كل ماأحتاجه هو أن أقيس التغيرات التى تحدث فى طاقة النظام فى تلك الفترة ، وبعد ذلك أقوم - كمحاسب ماهر - بإيجاد إجمالى ميزانية الطاقة وأخبرك ماهى الطاقة الداخلية للنظام فى ذلك الوقت . إذن ، الطاقة الداخلية متغير حالة .

١٢ - ٢ القانون الأول للديناميكا الحرارية

القانون الأول للديناميكا الحرارية هى احدى ركيزتين اساسيتين يرتكز عليهما علم الديناميكا الحرارية بأكمله . وفى الحقيقة فإن أول المؤسسين لعلم الديناميكا الحرارية هم الباحثون الأوائل فى مجال بقاء الطاقة أيضا . وعندما يصاغ

* تستخدم كلمة « ماكروسكوبى » للإشارة إلى أن القياسات تتعلق بالتأثير المتوسط لبلاتين أو أكثر من الجزيئات .

قانون بقاء الطاقة في صورة عامة لنظام ما ، فإن هذه الصيغة تسمى القانون الأول للديناميكا الحرارية . لتبين الآن كيف توضع هذه الصيغة .

لكل نظام في حالة معينة كمية محددة من الطاقة الداخلية U . وهذه الطاقة يمكن أن تتكون من بعض أو كل أنواع الطاقة التي تشمل طاقتي الحركة والوضع والطاقتين الكيميائية والنووية . بالإضافة إلى ذلك ، يمكن أن تتغير الطاقة الداخلية للنظام بإحدى طريقتين عامتين : (١) بانتقال الطاقة الحرارية إلى النظام أو منه ، (٢) بأن يبذل النظام شغلا ضد بعض أنواع القوى الخارجية . لتلخيص هذه الحقيقة في صورة معادلة يجب أن نعرف الكميات الآتية :

الزيادة في الطاقة الداخلية للنظام $\Delta U =$

الحرارة التي تنتقل إلى النظام $\Delta Q =$

الشغل المبذول بواسطة النظام $\Delta W =$

إذن :

(١٢ - ١)

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

القانون الأول
للدديناميكا
الحرارية

وهذه المعادلة هي صيغة القانون الأول للديناميكا الحرارية ، وهي أيضا صيغة لقانون بقاء الطاقة .

عند تطبيق القانون الأول يجب أن نحصر حرصا شديدا في استخدام الإشارتين + و - . ذلك أن هذا القانون عبارة عن معادلة ميزانية ، ولذلك يجب أن تسجل أرصدة الدائن والمدين بمنتهى العناية . وحسب الاتفاق والعرف المتبعين ، ΔW هي الشغل المبذول بواسطة النظام . وعليه فإن هذه الكمية تؤدي إلى نقص U ، ولذلك فهي تظهر سالبة في المعادلة (١٢ - ١) . من ناحية أخرى ΔQ هي الحرارة التي تنتقل إلى النظام . لذلك فإنها تسبب زيادة U ، وعليه فإنها تظهر موجبة في المعادلة (١٢ - ١) .

ينطبق القانون الأول على جميع الأنظمة مهما كانت معقدة . فمثلا ، اعتبر جسمك كنظام ، (ولكي يظل هذا النظام بسيطا لن يسمح لك بالأكل أو الإخراج) . هذا النظام يفقد طاقة داخلية باستمرار بمرور الوقت . ويعتبر الطعام الذي تناولته قبل ذلك جزء من الطاقة الداخلية . وهذه الصورة وكذلك الصور الأخرى من الطاقة الداخلية تستهلك بتقدم النهار . وتفقد معظم هذه الطاقة على هيئة حرارة تنتقل من جسمك إلى الوسط المحيط ، ويفقد النظام جزءا صغيرا من الطاقة

الداخلية عندما يبدل جسمك شغلا على الأجسام المحيطة به . يمكننا إذن كتابة القانون الأول بالنسبة لجسمك بالطريقة الآتية :

- الشغل المبذول - الحرارة المفقودة = - النقص في الطاقة الداخلية

هل يمكنك أن تشرح لماذا استخدمت الإشارة السالبة في جميع حدود هذه المعادلة لكي تستطيع ذلك ربما كان من الأفضل أن تعود إلى معنى القانون الأول وليس تطبيق المعادلة (١٢ - ١) مباشرة .

١٢ - ٣ الشغل المبذول أثناء تغير الحجم

في كثير من التطبيقات العملية للديناميكا الحرارية يقوم النظام ببذل الشغل أثناء تغير الحجم . من الضروري إذن أن نعلم العلاقة بين الشغل وتغير الحجم . وللتبسيط ، اعتبر النظام الميّن في الشكل ١٢ - ١ الذي يمثل كمية من الغاز في اسطوانة مغلقة بكباس . سنحاول الآن حساب كمية الشغل الذي يبذله الغاز عندما يتمدد ويدفع الكباس إلى أعلى قليلا .

وإذا كانت إزاحة الكباس صغيرة فإن ضغط الغاز لن يتغير كثيرا . وعليه ، فإن القوة التي يؤثر بها الغاز على الكباس تعطى - من تعريف الضغط - بالعلاقة الآتية :

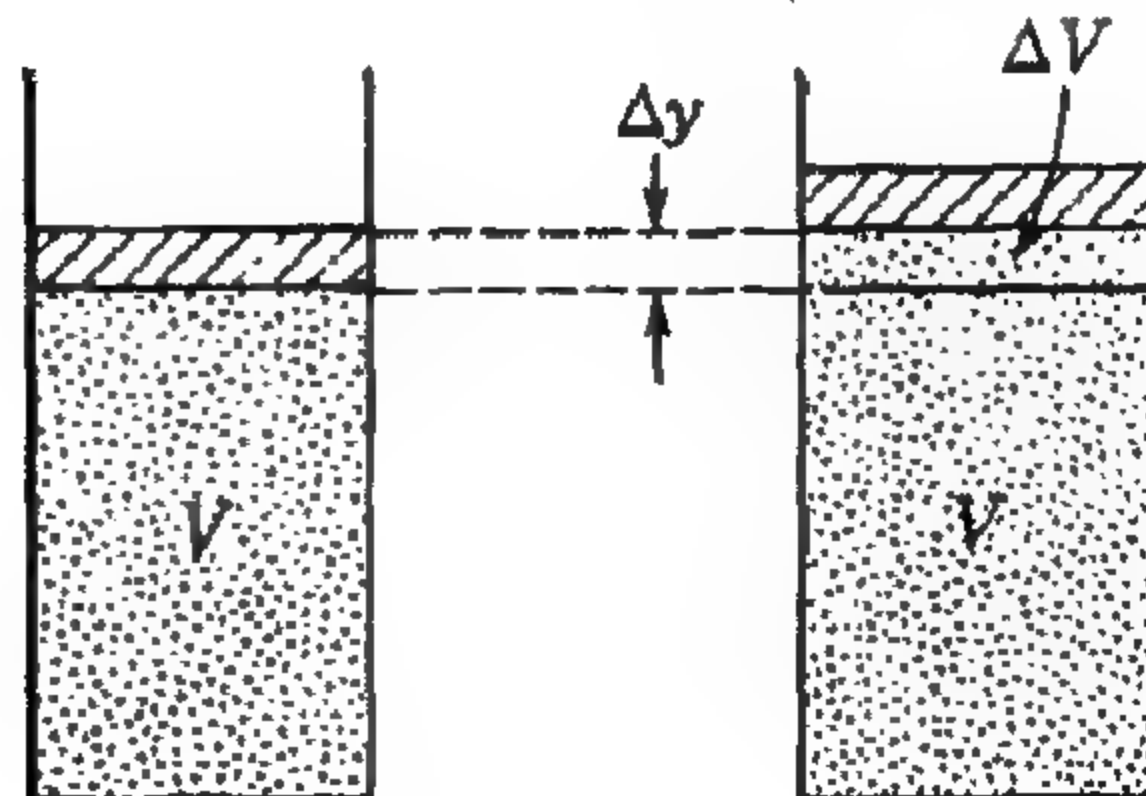
$$P = \frac{F}{A}$$

أو :

$$F = PA$$

حيث A مساحة سطح الكباس . وإذا كانت الإزاحة الصغيرة هي Δy ، فإن الشغل المبذول بواسطة الغاز على الكباس هو :

$$\begin{aligned} \Delta W &= (\text{المسافة} \times \text{القوة}) \cos \theta \\ &= (PA)(\Delta y)(1) = P(A \Delta y) \end{aligned}$$



شكل (١٢ - ١)
إذا كانت مساحة الكباس
هي A ، فإن $\Delta V = A \Delta y$

ولكن الكمية $A \Delta V$ هي ببساطة الزيادة في حجم الغاز ΔV . إذن :

(١٢ - ٢)

$$\Delta W = P \Delta V$$

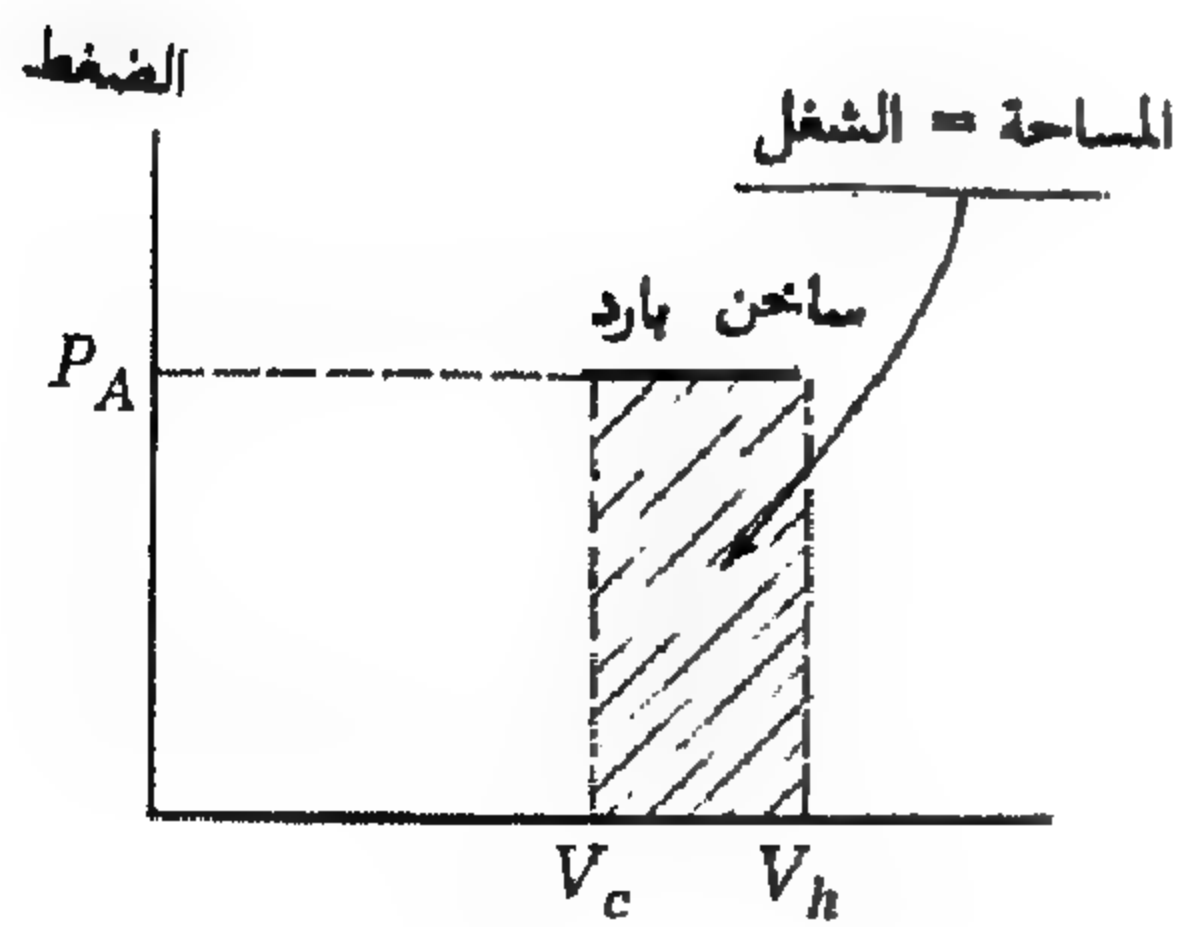
الشغل المبذول
أثناء التمدد

تنطبق المعادلة (١٢ - ٢) على أى نظام يظل ضغطه P ثابتا أثناء التغير الحجمي ΔV . ويعطى الشغل الذى يبذله النظام أثناء تمدده بمقدار ΔV ضد ضغط قدره P ببساطة بالكمية $P \Delta V$. وإذا كان النظام ينكمش فإن ΔV سيكون سالبا ، وفي هذه الحالة يبذل النظام شغلا سالبا . وفي الحقيقة فإن الوسط المحيط هو الذى يبذل شغلا على النظام .

من المهم عادة أن نلاحظ أن شغل التمدد لنظام ما يمكن تمثيله بمساحة في نوع معين من الأشكال البيانية يسمى الرسم البياني $P-V$. وكمثال بسيط جدا لهذا الرسم البياني ، اعتبر حالة التمدد الحرارى لجسم معدنى صلب ، كما هو مبين في الشكل ١٢ - ٢ . وعند تسخين هذا الجسم فإنه يتمدد ، ويلاحظ أن هذا يتم أثناء وجود الجسم تحت تأثير الضغط الجوى P_A ، وبالطبع فإن P_A يظل ثابتا أثناء التمدد . ويمكننا تمثيل هذا التمدد كما هو مبين في الرسم البياني $P-V$ الموضح في الجزء ب من الشكل .

ونرى من هذا الشكل أن الجسم يبدأ في التمدد عند النقطة « بارد » في الشكل ، وفي هذه النقطة يكون V_c هو حجم الجسم و P_A هو الضغط المؤثر عليه . وأثناء التمدد يتغير حجم النظام متبعا الخط الأفقى المبين ، مع بقاء الضغط ثابتا . من المعادلة (١٢ - ٢) نجد أن الشغل المبذول بواسطة الجسم أثناء التمدد هو :

$$\Delta W = P \Delta V = P_A (V_h - V_c)$$



(ب)



(أ)

شكل (١٢ - ٢)
الشغل المبذول بواسطة
الجسم عندما يتمدد ضد
الضغط الجوى يساوى
المساحة الموجودة تحت
المنحنى $P-V$. (أ) يتمدد
الجسم عند تسخينه ، (ب)
الرسم البياني $P-V$ للتجربة
الموضحة في (أ)

ولكن الكمية P_A هي ارتفاع المستطيل المظلل في الشكل ١٢ - ٢ب ، بينما $V_h - V_c$ هي عرضه . إذن ، $P_A(V_h - V_c)$ يساوية المساحة المظلمة . نستنتج إذن أن :

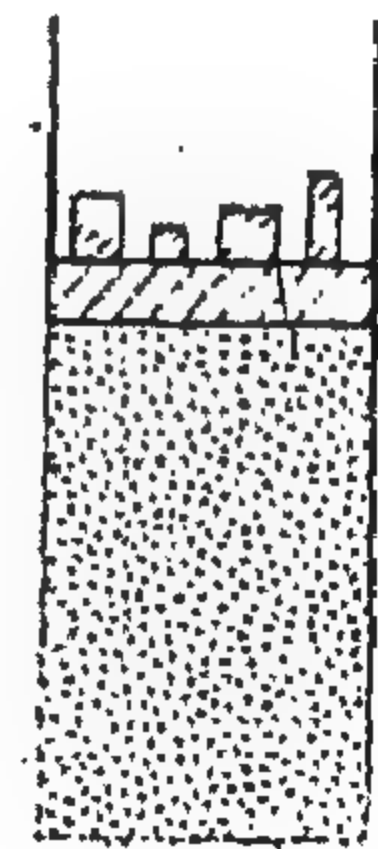
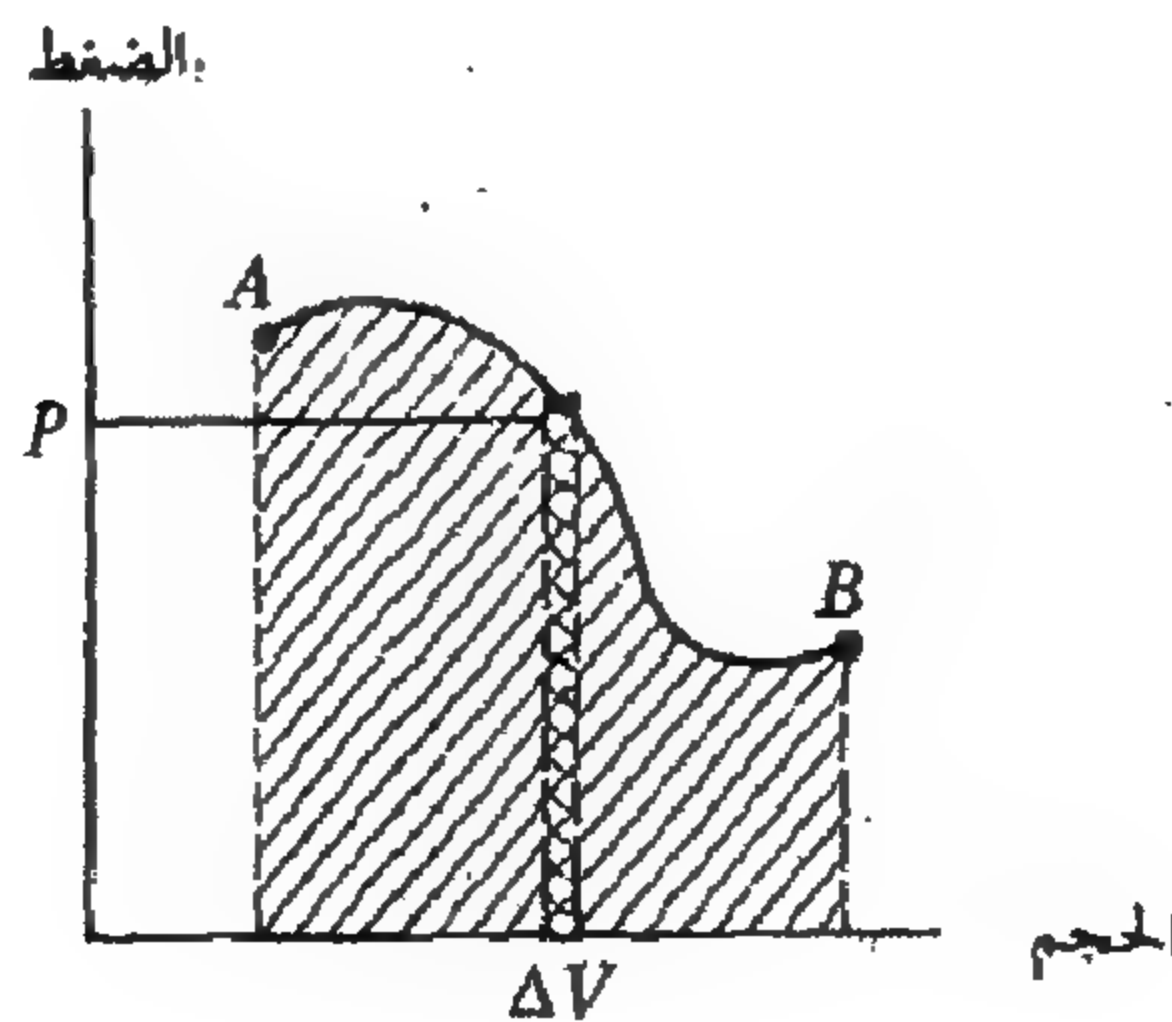
الشغل وعلاقته
بالمساحة

شغل التمدد المبذول بواسطة النظام يساوي المساحة الموجودة تحت المنحنى $P-V$ لهذا النظام .

وبالرغم من أن هذه العلاقة قد اشتقت في حالة بسيطة جدا ، فإنها صحيحة عموما . ولكي نتأكد من ذلك ، لنرجع إلى الشكل ١٢ - ٣ .

يمثل هذا الشكل غازا في اسطوانة مغلقة بواسطة كباس . ويمكن تغيير الضغط على الكباس بإضافة أو انقاص الأوزان عليه . كذلك يمكن تغيير الضغط والحجم أيضا بتسخين الغاز أو تبريده . لنفرض أن الشروط قد تغيرت بحيث تغير الحجم من V_A إلى V_B متبعا للمسار المبين في الجزء ب من الشكل .

اعتبر المساحة الصغيرة المظلمة بشدة والتي تمثل تغير الحجم بمقدار ΔV عند ضغط ثابت ، تقريبا ، مقداره P . الشغل المبذول في هذا الجزء الصغير من التمدد الكلي يساوي $P \Delta V$. ولكن هذه الكمية تساوي مساحة المستطيل المظلل بشدة . بالمثل ، يمكن اعتبار التمدد الكلي من A إلى B . كما لو كان مكونا من مجموعة من مثل هذه التمددات الصغيرة . والشغل المبذول أثناء كل منها يساوي المساحة الموجودة تحت المنحنى $P-V$ الخاص بها . وعليه فإن الشغل الكلي المبذول يساوي مجموع جميع هذه المساحات الصغيرة ، أي المساحة الموجودة تحت المنحنى من A إلى B نرى من ذلك إذن أن شغل التمدد يساوي دائما المساحة الموجودة تحت المنحنى $P-V$.



(أ)

(ب)

شكل (١٢ - ٣)
الشغل المبذول بواسطة
النظام عند الانتقال من A
إلى B يساوي المساحة
الموجودة تحت المنحنى .

مثال توضيحي ١٢ - ١ . سخن مكعب من النحاس الأصفر طول كل من اضلاعه 15 cm من 20°C إلى 300°C ما هي كمية الشغل التي يبذلها المكعب أثناء التمدد ؟

طريقة الحل . يتمدد المكعب ضد الضغط الجوي وهو حوالى $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.
وطبقا لمعادلة التمدد الحرارى :

$$\Delta V = V \gamma \Delta T$$

وفى هذه الحالة $V = (0.15)^3 \text{ m}^3$ ، $\Delta T = 280^\circ \text{C}$ ، $\gamma = 5.7 \times 10^{-5} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$ ،

بالتعويض فى المعادلة السابقة نجد أن $\Delta V = 5.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$

والآن نستخدم العلاقة :

$$\Delta W = P \Delta V$$

لنحصل على :

$$\Delta W = 5.4 \text{ J}$$

من المهم أن نلاحظ أن الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة هذه الكمية من النحاس الأصفر بمقدار 280°C تساوى 10^6 cal تقريبا . إذن ، كمية الحرارة المستهلكة فى بذل شغل التمدد تساوى أقل من جزء واحد من المليون من الطاقة الحرارية الكلية .

١٢ - ٤ العمليات المألوفة فى الغازات

رأينا تزا أن المنحنى $P-V$ لنظام يعانى تغيرا فى الحالة يرتبط بالشغل المبذول بواسطة النظام . وعند رسم مثل هذا الرسم البياني يفترض أن التغير بطيء بدرجة تكفى لاعتبار الضغط ودرجة الحرارة منتظمين فى أى لحظة خلال النظام بأكمله . لنفحص الآن بعض الطرق الهامة لحدوث تغير فى نظام يتكون من كمية من الغاز . العملية

تعريف الأيسوثرمية (أو العملية ثابتة درجة الحرارة) ، هى تلك التى تتم مع ثبوت درجة الحرارة . وحيث أن درجة حرارة الغاز المثالى مقياس لطاقته الداخلية ، فإن العملية الأيسوثرمية العملية الأيسوثرمية هى عملية ثابتة الطاقة الداخلية . وعليه فإن $\Delta U = 0$ أثناء العملية الأيسوثرمية فى حالة الغاز المثالى . وعندئذ يتحول القانون الأول :

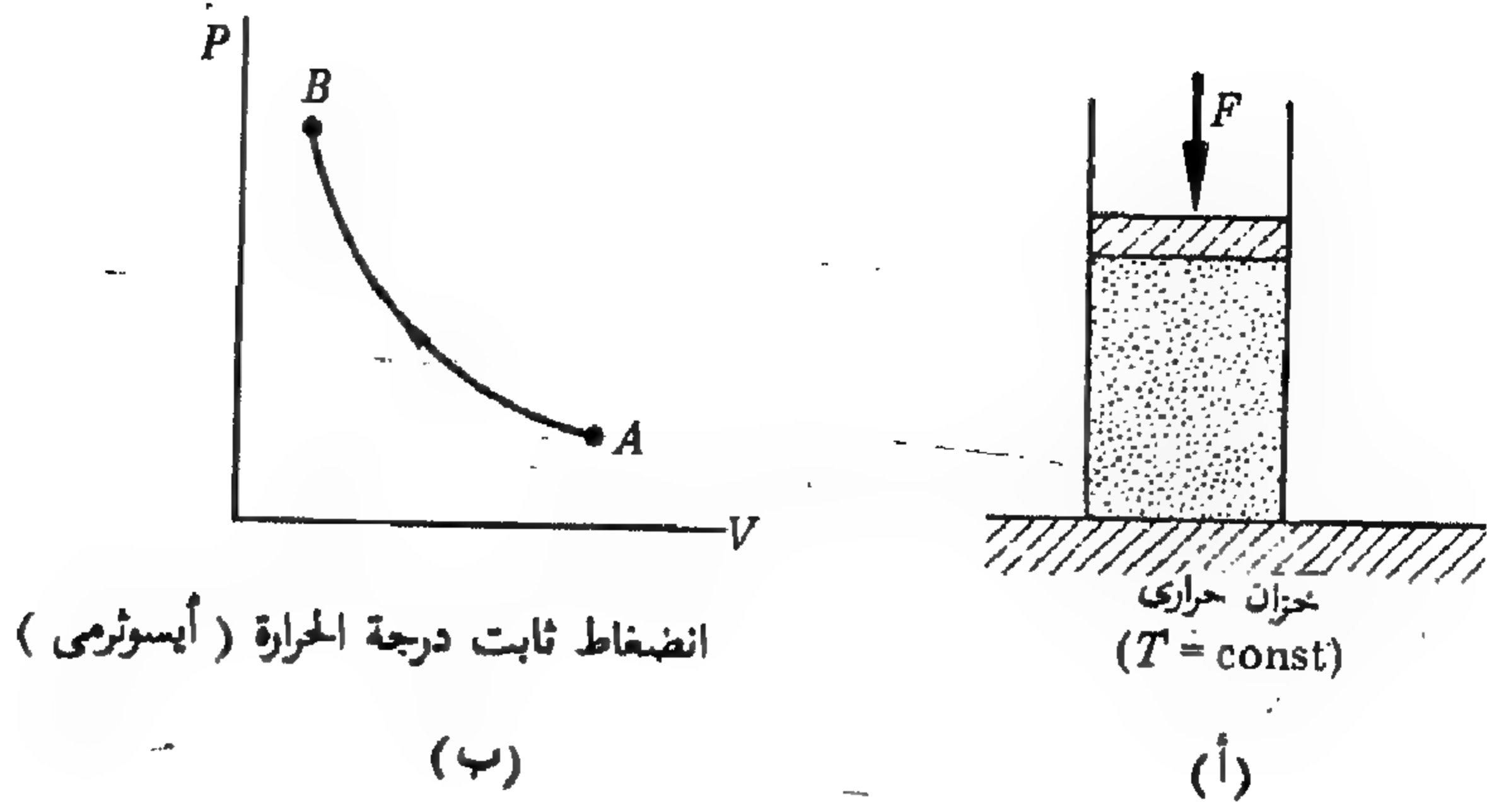
$$\Delta Q = \Delta U - \Delta W$$

إلى الصورة :

$$\Delta Q = -\Delta W$$

غاز مثالى ، ايسوثرمى

شكل (١٢ - ٤)
الرسم البياني $P-V$ للانضغاط
ثابت درجة الحرارة (أو
الأيسوترمي) :



لتوضيح معنى هذه العلاقة ارجع إلى الموقف المبين في الشكل ١٢ - ٤ ، ويمثل هذا الشكل وعاء يحتوي على كمية من الغاز ويتلامس تلامسا حراريا جيدا مع الخزان الحراري . وقد يكون هذا الخزان الحراري فرنا أو حمام تبريد أو أى جهاز آخر درجة حرارته ثابتة . وهذا الخزان يحفظ درجة حرارة الوعاء والغاز ثابتة بشرط ألا يتحرك الكباس الذى يغلق الوعاء بسرعة كبيرة .

لنفرض أننا وضعنا أوزانا على الكباس المبين في الشكل ١٢ - ٤ ببطء . عندئذ سوف يزداد الضغط ويقل الحجم ببطء كذلك . وإذا رسمنا العلاقة بين الضغط والحجم لهذه العملية الأيسوترمية فإننا سنحصل على الرسم $P-V$ المبين في الجزء ب من الشكل . ويعطى شكل هذا الرسم البياني بقانون الغاز المثالي :

$$PV = nRT$$

الذى يتحول في حالة العملية الأيسوترمية إلى الصورة :

$$P = \frac{\text{const}}{V}$$

لان T ثابتة . وهذه هي معادلة الخط المستقيم المبين في الشكل ١٢ - ٤ .

لنفرض الآن أن الغاز قد انضغط من النقطة A إلى النقطة B على الرسم البياني . والآن إذا أنقصت القوة المؤثرة على الكباس ببطء فإن العلاقة بين P و V ستكون صحيحة . في هذه الحالة سوف يتبع النظام نفس الخط البياني عندما يعود من الحالة B إلى الحالة A . وتسمى مثل هذه العملية بالعملية الانعكاسية . لاحظ أن متغيرات الحالة تكتسب أثناء العملية الانعكاسية نفس القيم في جميع مراحل العملية بصرف النظر عن الاتجاه الذى تجرى فيه هذه العملية . لاحظ كذلك أن العمليات ليست جميعها انعكاسية . فمثلا ، العملية التى تتضمن فواقد احتكاك كبيرة لا يمكن أن تكون انعكاسية . لماذا ؟

العملية
الانعكاسية

تعريف

العملية الأدياباتيية هي تلك التي لا يفقد النظام أو يكتسب خلالها طاقة حرارية . فمثلا ، إذا كان النظام معزولا عزلا جيدا عن الوسط المحيط ، فإن انتقال الحرارة يكون مهملا عادة . كذلك إذا أجريت العملية بسرعة كبيرة . (كالانضغاط الفجائي لغاز مثلا) ، فإن كمية الحرارة التي تنتقل من أو إلى النظام خلال تلك الفترة الزمنية القصيرة تكون صغيرة جدا ويمكن إهمالها . وعليه فإن هذه العملية أدياباتيية .

العملية
الأدياباتيية

وإذا كانت العملية أدياباتيية ، فإن القانون الأول :

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

يصبح :

$$\Delta U = -\Delta W \text{ للعملية الأدياباتيية}$$

وهذه العلاقة ليست مقصورة على الغاز المثالي . وهي تبين لنا أنه إذا كان النظام يبذل شغلا أدياباتييا فإن الطاقة الداخلية للنظام لابد أن تنقص . هذا لأن الشغل يبذل على حساب الطاقة الداخلية . أما إذا كان الشغل الأدياباتي مبدول على النظام ، فإن الطاقة الداخلية يجب أن تزيد . وبين المثالان التوضيحيان التاليان استخدامين عمليين لهذه العمليات . ومع ذلك ، فإننا سوف ندرس أولا السلوك الأدياباتي للغاز المثالي ببعض التفصيل ..

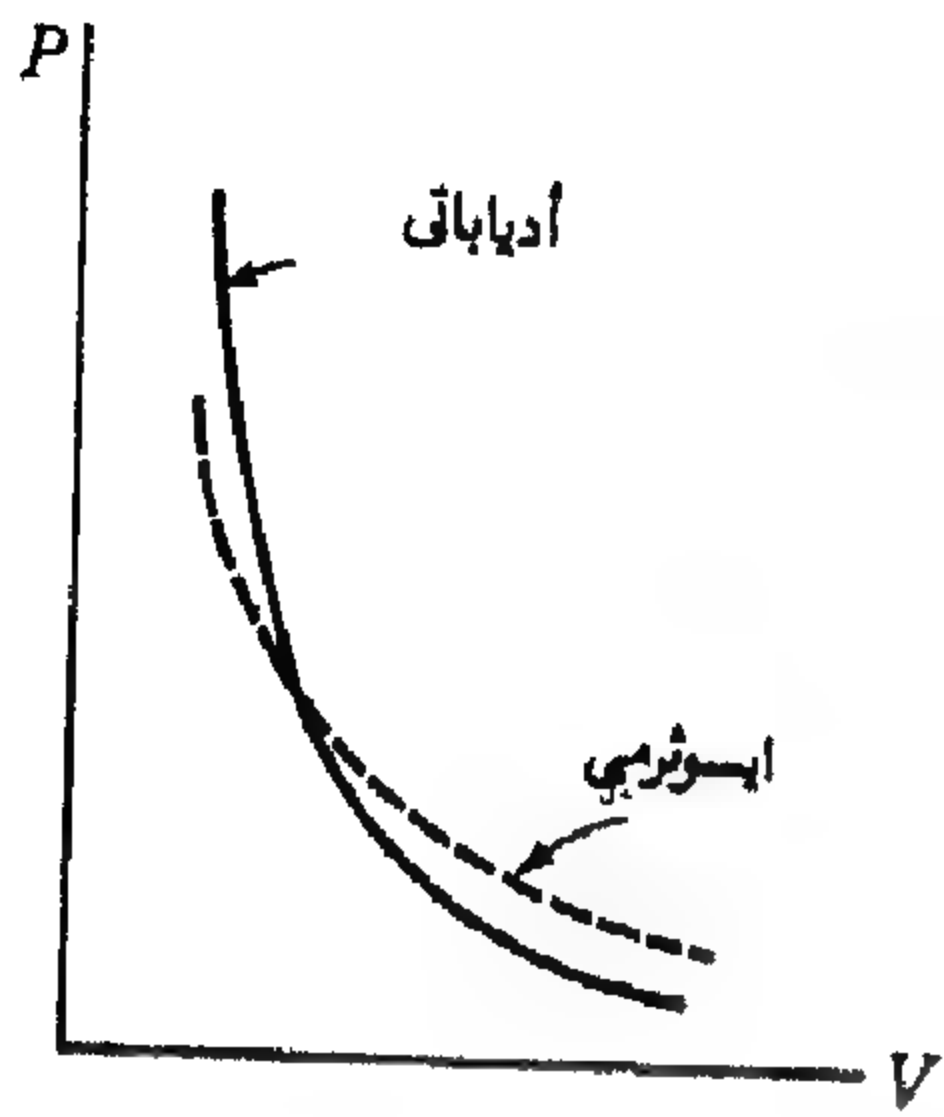
في حالة الغاز المثالي لا توصف العملية الأدياباتيية بدلالة القانون $PV = nRT$ وحده . وتكمن الصعوبة في أن متغيرات الحالة الثلاثة (T ، V ، P) تتغير جميعها أثناء العملية ، ولإيجاد كيفية تغير كل منها تلزمنا معادلة أخرى . ويمكن إيجاد هذه المعادلة بملاحظة أن الشغل المبذول على الغاز يتحول تماما إلى طاقة داخلية ، وهذه الزيادة في الطاقة الداخلية تسبب تغير درجة الحرارة في النظام . ولكن نفس هذا التغير في درجة الحرارة يمكن أن يتحقق بإضافة الحرارة إلى النظام . ومن ثم فإن من الممكن إيجاد علاقة بين كمية الحرارة وتغير درجة الحرارة والشغل حتى في حالة العملية الأدياباتيية . ويؤدي هذا الخط في التفكير في حالة الغاز المثالي إلى النتيجة التالية :

إذا حدث تغير أدياباتي في الغاز المثالي من P_1 ، V_1 ، T_1 إلى P_2 ، V_2 ، T_2 فإن

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (12 - 3)$$

حيث $\gamma = c_p/c_v$ للغاز المثالي . وقد اعطيت بعض القيم الفعلية للنسبة c_p/c_v سابقا في الجدول ١١ - ٢

يعطى الخط البياني $P-V$ للتغير الأدياباتي بالمعادلة (١٢ - ٣) ، ويمثل الشكل ١٢ - ٥ إحدى حالات التغير الأدياباتي . وللمقارنة ، وضعنا في نفس الشكل الخط البياني $P-V$ لتغير ايسوثيرمي (الخط المنقط) . وكما هو متوقع ، يلاحظ من الشكل أن الخط البياني الأدياباتي أكثر انحدارا من الخط الأيسوثيرمي عند القيم المتقاربة من P و V .



شكل (١٢ - ٥)
مقارنة بين التغير الأدياباتي
والتغير الايسوثيرمي لغاز
مثالي .

مثال توضيحي ١٢ - ٢ : في محرك ديزل يشعل الوقود في أسطوانة المحرك بضغط الغاز فجأة في الأسطوانة . لنفرض أن حجم الغاز قد انضغط إلى جزء من خمسة عشر من قيمته الأصلية . بفرض أن الضغط الابتدائي يساوي الضغط الجوي تقريبا ، أي $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ، وبفرض أن درجة الحرارة الابتدائية 27°C ، أوجد درجة الحرارة النهائية للغاز . افترض أن الغاز الموجود في الاسطوانة هو الهواء أو النتروجين .

طريقة الحل . هذه هي عملية أدياباتيية أساسا ، لأن الغاز يضغط في الأسطوانة بسرعة كبيرة . وإذا اعتبرنا أن الغاز هو النتروجين N_2 وأنه يتصرف كغاز مثالي ، فإن الجدول ١١ - ٢ يعطينا القيمة $\gamma = 1.40$. ونحن نعلم أن :

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

أو :

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma$$

ولكننا نهتم بالتغير في درجة الحرارة وليس الضغط . لهذا يجب تطبيق قانون الغاز المثالي على الحالة الابتدائية للغاز وعلى حالته النهائية . إذن :

$$P_1 V_1 = nRT_1$$

و :

$$P_2 V_2 = nRT_2$$

بقسمة إحدى المعادلتين السابقتين على الأخرى واجراء التبسيط اللازم نجد أن :

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

بالتعويض بين هذه المعادلة في المعادلة الأساسية نجد أن :

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

وفي حالتنا هذه $V_2/V_1 = 1/15$ ، إذن :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{1}{15}\right)^{-0.40}$$

وحيث أن درجات الحرارة T في هذه العلاقات هي درجات الحرارة المطلقة ، فإن $T_1 = 300 \text{ K}$. بأخذ اللوغاريتم طرفي المعادلة نجد أن :

$$\begin{aligned} \log T_2 &= \log (300) - 0.40(\log 1 - \log 15) \\ &= 2.477 - 0.40(0 - 1.176) \\ &= 2.947 \end{aligned}$$

وبأخذ مقابل اللوغاريتم نجد أن $T_2 = 886 \text{ K}$ أي 613°C . لاحظ كيف أصبح الغاز ساخنًا جدًا بسبب الانضغاط الأدياباتي .

مثال توضيحي ١٢ - ٣ : كما هو واضح في الشكل ١٢ - ٦ أ ، قسم وعاء مغلق إلى قسمين ، أحدهما صغير يحتوي على غاز تحت ضغط عال ، والآخر كبير ومفرغ تمامًا . ثقت فتحة صغيرة في الجدار الموصل بين الجزئين لكي يتمدد الغاز من الغرفة الصغيرة إلى الغرفة المفرغة الكبيرة . صف تغير حرارة الغاز بفرض أن العملية أدياباتية .

تسمى هذه العملية ، التي يتمدد فيها المائع خلال فتحة صغيرة أو قرص مسامي ، عملية تخفيف الضغط بالحنق ، وحيث أنها أدياباتية ، يمكننا كتابة القانون الأول على الصورة :

$$\Delta U = -\Delta W$$

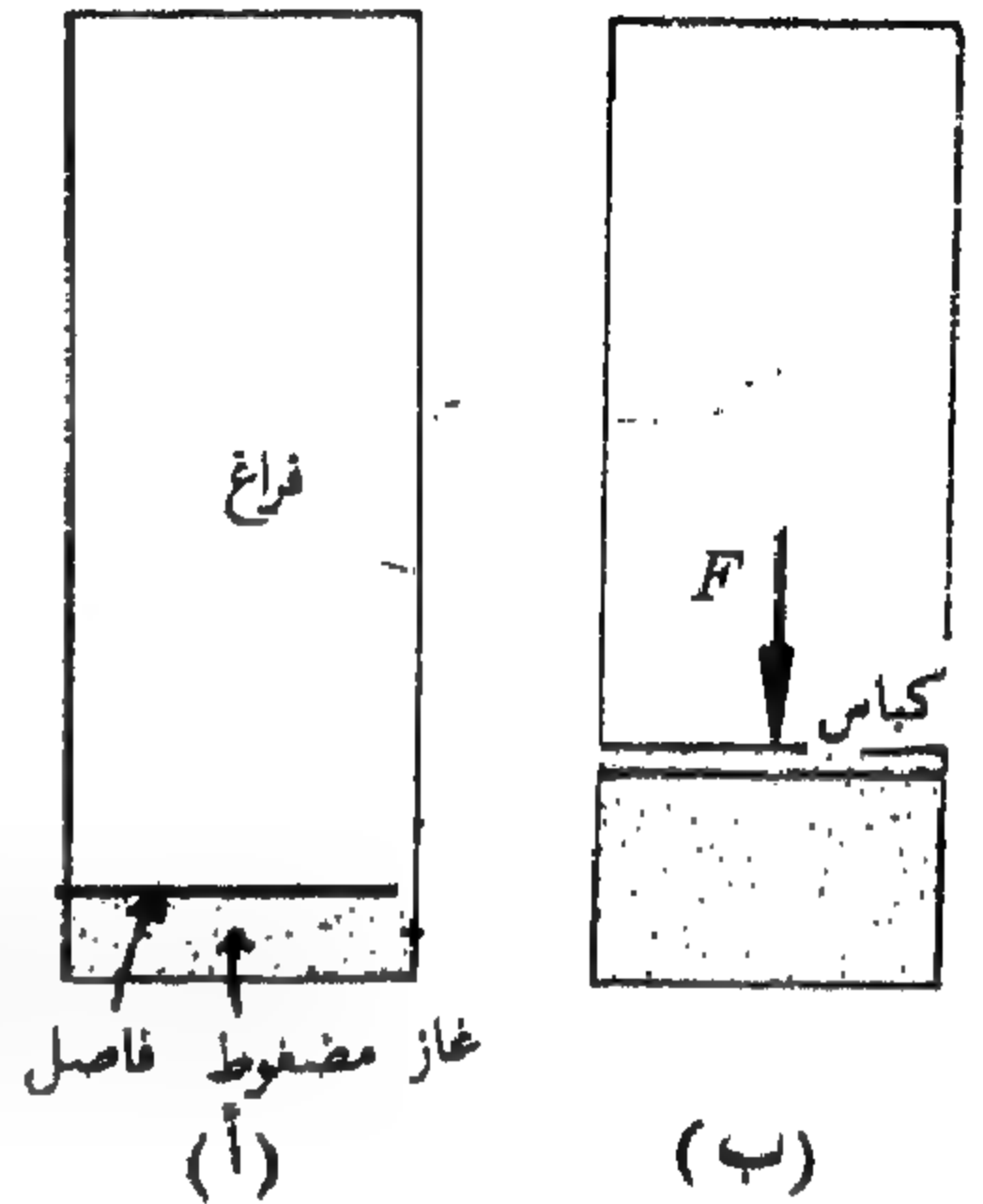
حيث ΔW هو الشغل المبذول بواسطة المائع أثناء العملية .

المطلوب منا هو معالجة الغاز كحالة خاصة . لنفرض أولاً أن الغاز مثالي . لذلك يمكننا أن نقول أن الغاز المثالي لا يبذل شغلاً محصلاً أثناء عملية التمدد في الفراغ ، وهي الموضحة في الشكل ١٢ - ٦ أ . وهذا لأن الضغط الخارجي الذي يقاوم التمدد يساوي صفراً ، وبالتالي $P \Delta V = 0$. وحيث أن الغاز لا يبذل أى شغل ، فإن المعادلة $\Delta U = -\Delta W$ تبين لنا أن الطاقة الداخلية للغاز لا تتغير . وحيث أن $U \sim T$ في حالة الغاز المثالي ، فإن T لا تتغير . إذن ، إذا كان الغاز المتمدد غازاً مثالياً ، فإن درجة الحرارة تظل ثابتة أثناء التمدد .

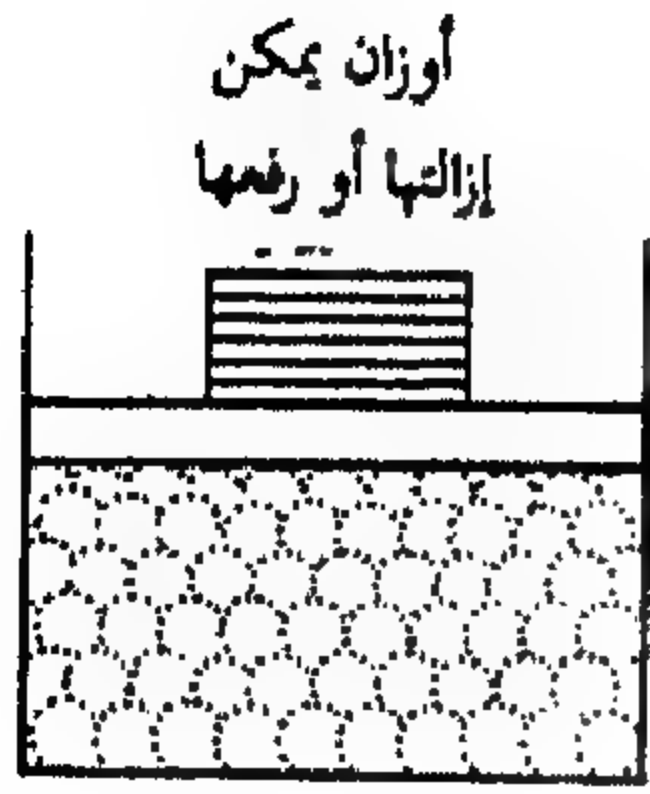
ومع ذلك فإن النتيجة سوف تختلف إذا لم يكن المائع غازاً مثالياً . لنفرض أن المادة المضغوطة سائل كالبيوتان الذي يتبخر عند تمدده في الفراغ . إذن لابد أن تزود الجزيئات بالطاقة لكي يتحول السائل إلى بخار ، وهذه الطاقة هي بالطبع حرارة التبخير . وحيث أن العملية أدياباتية ، فإن الطاقة اللازمة يجب أن تأتي من الطاقة

شكل (١٢ - ٦)

(أ) ثقت فتحة صغيرة في الفاصل لكي يتمدد الغاز ،
(ب) يرفع الغاز المتمدد الكباس إلى أعلى . تحت أى الشروط يكون تبريد الغاز أكبر ما يمكن ؟



عملية تخفيف
الضغط بالحنق



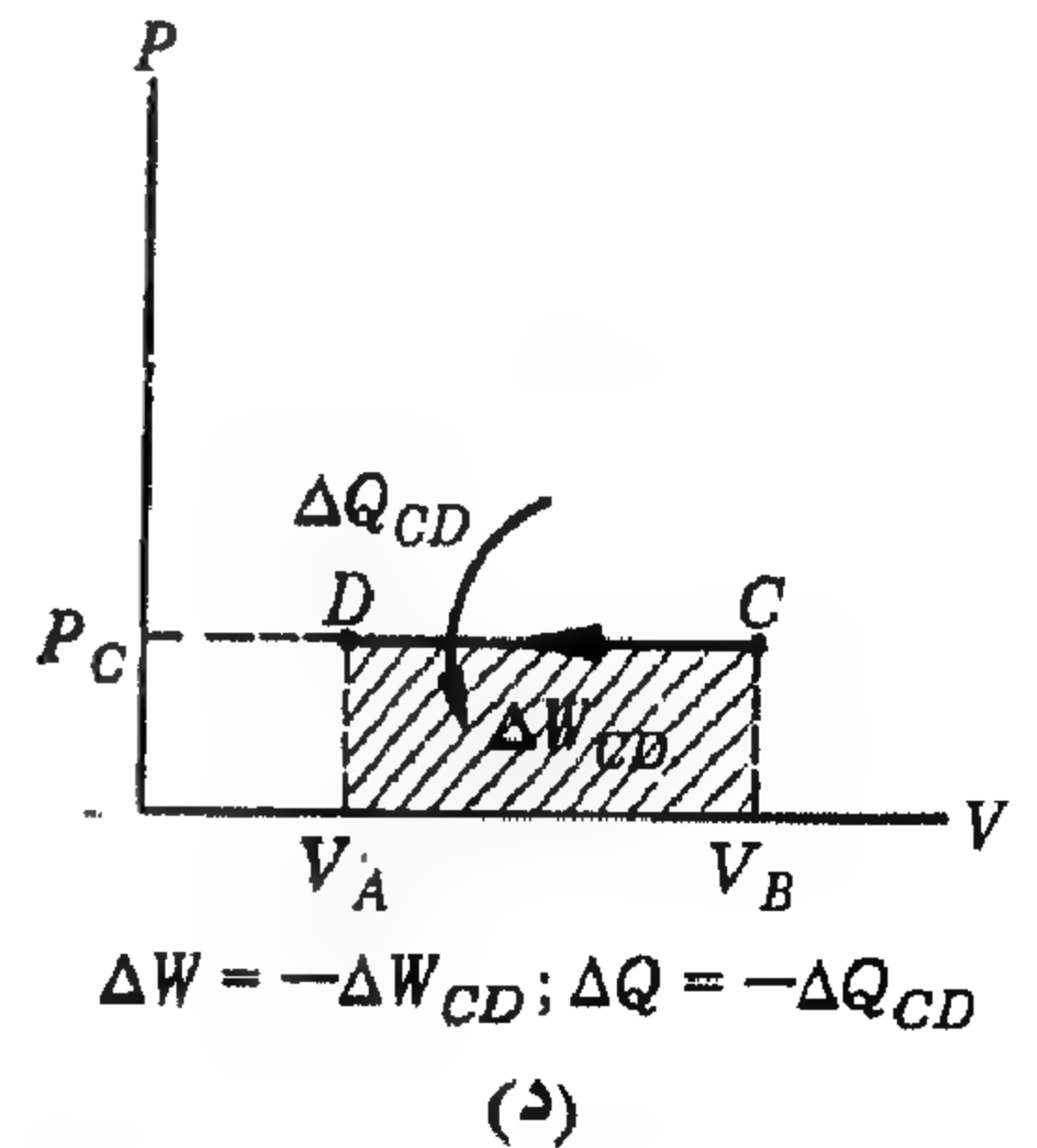
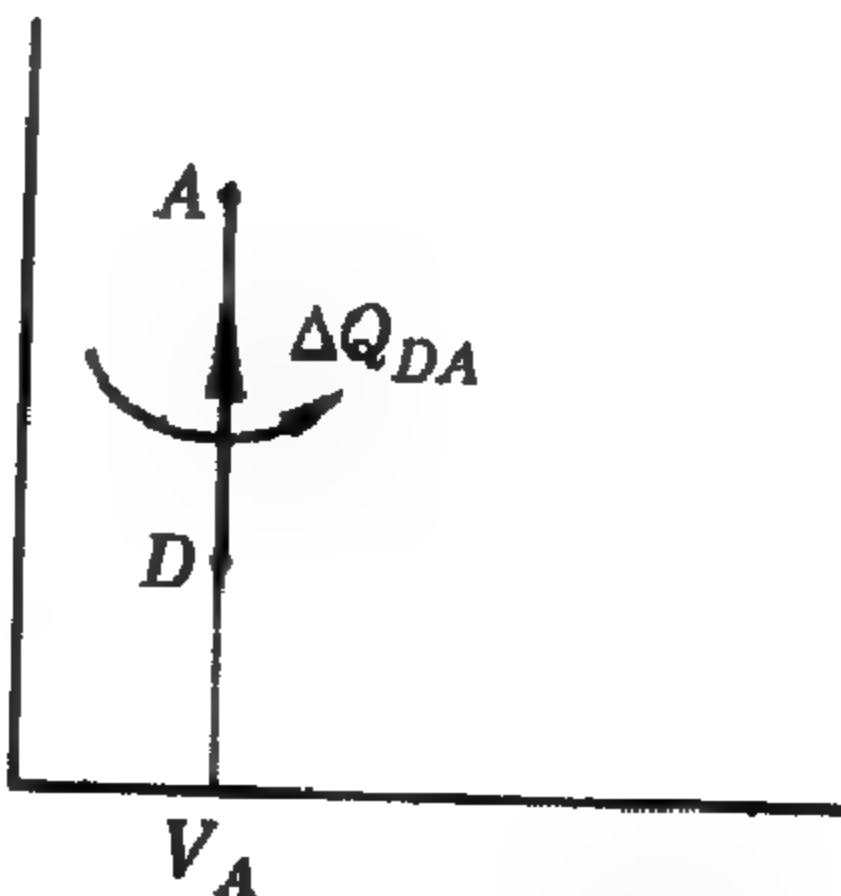
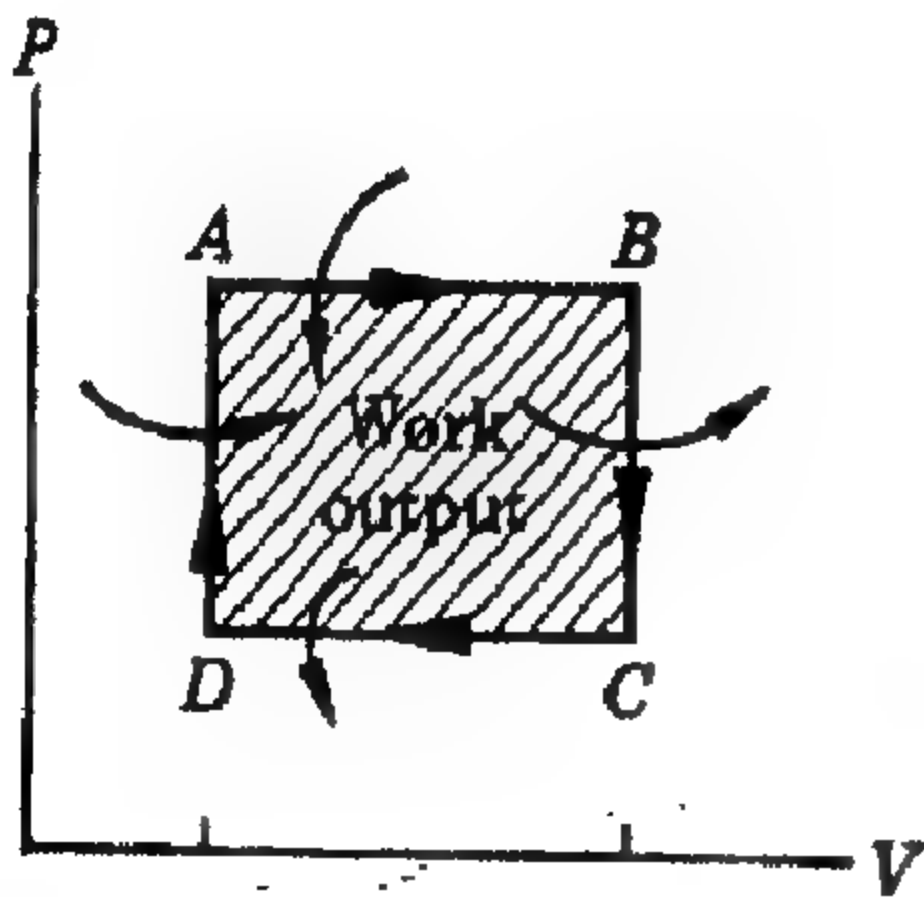
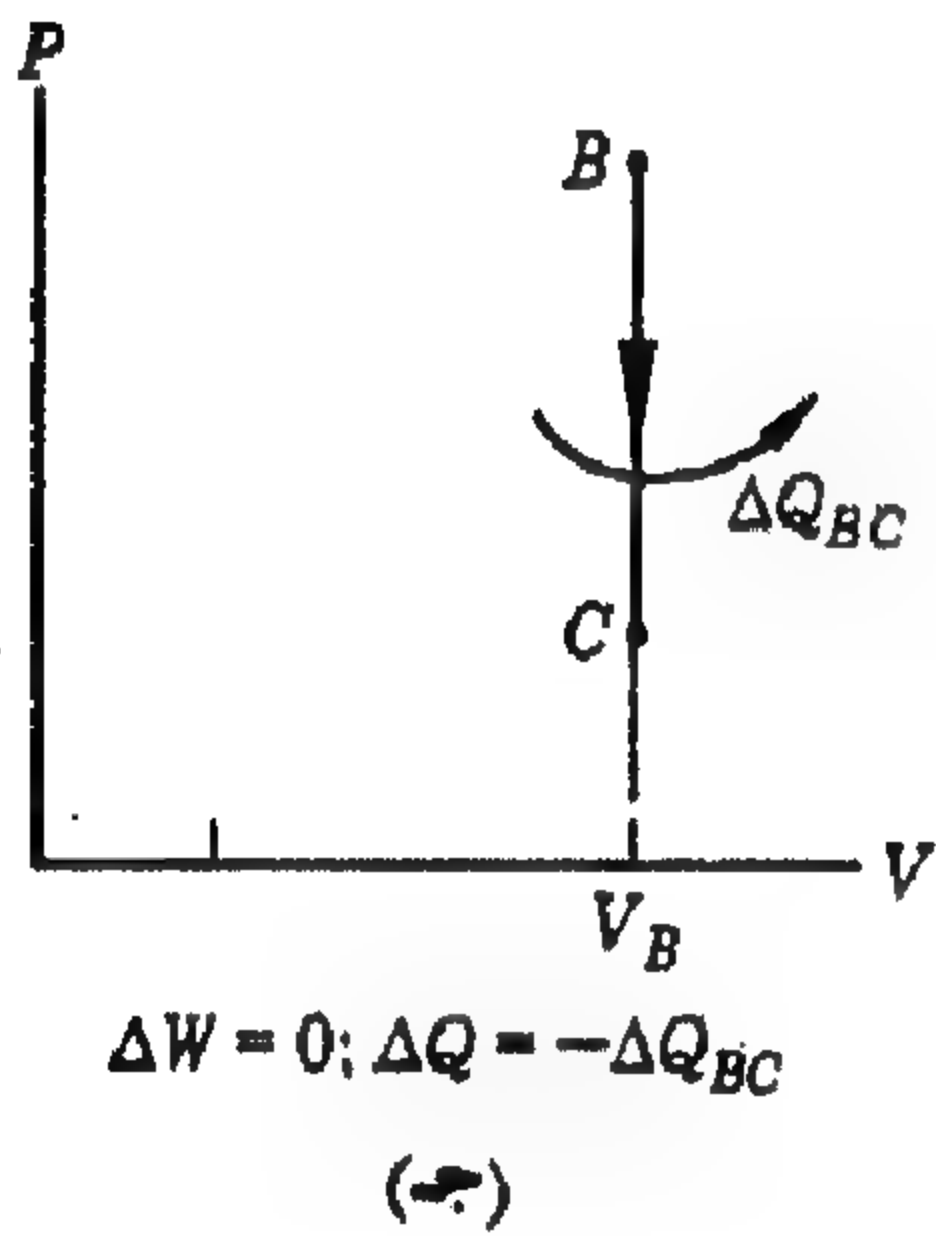
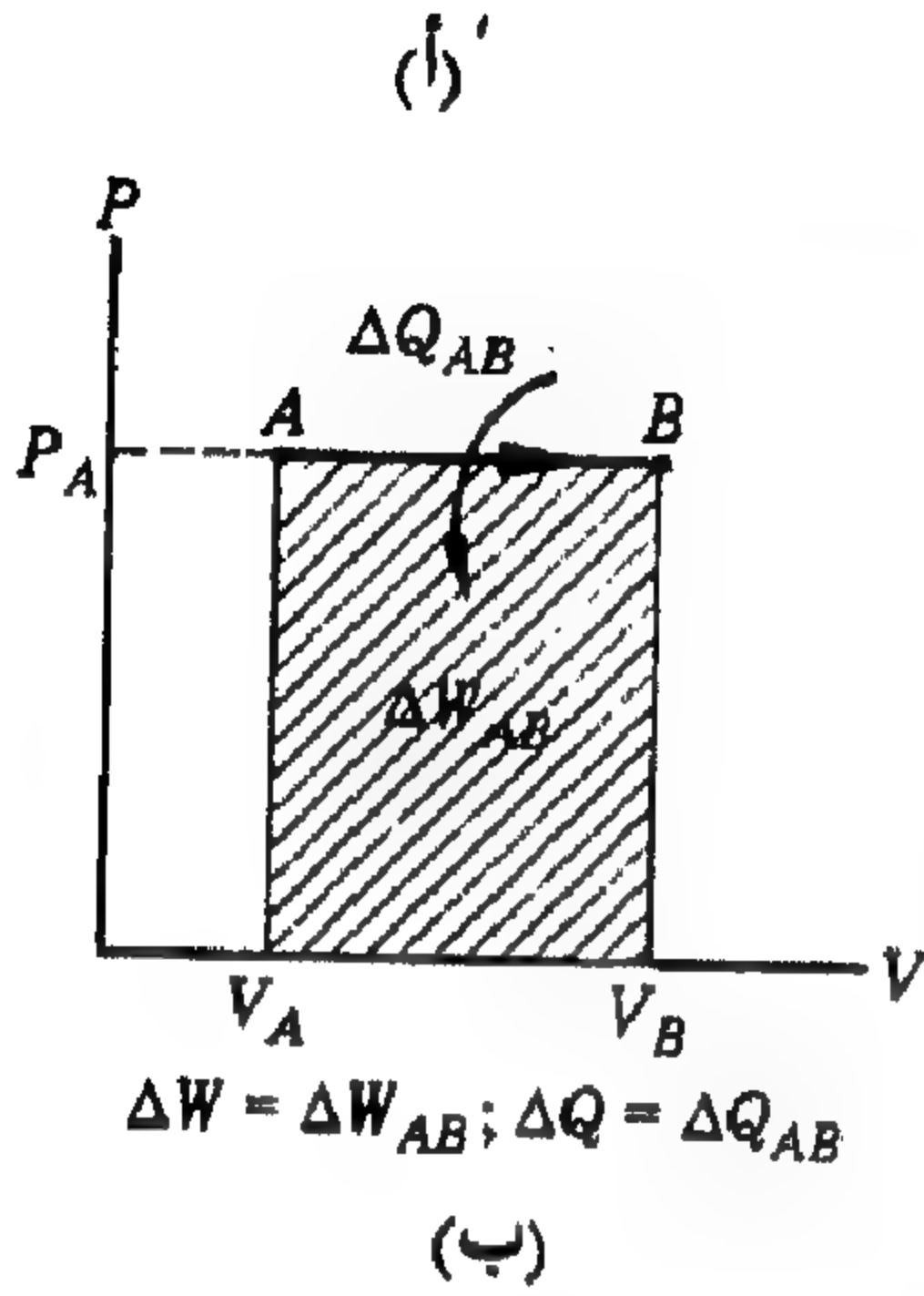
الداخلية الكامنة من قبل في المائع . نتيجة لذلك تقل طاقة حركة الجزيئات أثناء عملية التمدد ، وعليه فإن درجة حرارة البخار ستكون أقل من درجة حرارة السائل الأصلي (وهذا يشبه عملية التبريد بالتبخير إلى حد كبير) . ويمكنك أن ترى أن هناك إمكانيات عديدة بين الغاز المثالي ، حيث لا يحدث أي تبريد إطلاقاً ، وبين السوائل الطيارة ، حيث يحدث قدر كبير من التبريد .

ومع ذلك فإن الغاز المثالي ذاته يمكن أن يبرد في بعض الحالات الخاصة أثناء التمدد الأدياباتي . فمثلاً ، لنفرض أننا استعصنا عن الفاصل بكباس قابل للحركة كما هو مبين في الشكل ١٢ - ٦ ب . عندئذ سيبدل الغاز شغلاً أثناء التمدد ضد الكباس . وبالطبع سوف يؤدي هذا الشغل إلى نقص في الطاقة الداخلية للغاز ، وعليه فإن الغاز سوف يبرد .

١٢ - ٥ العمليات الدورية وتحول الطاقة

إن تطبيق الديناميكا الحرارية على المحركات والمبردات يعتبر واحد من التطبيقات الأساسية لهذا العلم . وتشابه جميع هذه الأجهزة في نقطة هامة ، وهي أنها تقوم بنفس العملية (أو الدورة) مراراً وتكراراً . وكما سوف نرى ، فإن كفاءة مثل هذا الجهاز محدودة بقانون من قوانين الطبيعة يجعل تصميم آلات أو محركات كفاءتها قريبة من 100% صعباً لدرجة كبيرة جداً تصل إلى الإستحالة .

ولكى نبدأ مناقشتنا ، اعتبر النظام المبين في الشكل ١٢ - ٧ أ . لنفرض أن قيمتي P ، V للنظام تعطيان بالنقطة A في الرسم البياني $P-V$ المبين في الجزء ب من الشكل . لنبدأ الآن في تسخين الغاز ببطء . عندئذ سوف يزداد الحجم من A إلى B ويظل الضغط ثابتاً أثناء هذه العملية لأن الأوزان الموجودة على الكباس لا تتغير . علاوة على ذلك فإن كمية من الحرارة ΔQ_{AB} تضاف إلى النظام كما هو مبين . وحيث أن الغاز يتمدد . فإنه يبذل أيضاً كمية من الشغل ΔW_{AB} تساوي المساحة المظللة .



شكل (١٢ - ٧)

دورة ديناميكية حرارية بسيطة
الشغل المحصل المبذول
يساوي المساحة المحصورة
داخل الدورة

لنبرد بعد ذلك النظام يبطء مع رفع الأوزان في نفس الوقت بحيث يظل الحجم ثابتا ، وهذا هو الجزء BC من الدورة المبين في الشكل ١٢ - ٧ جـ وحيث أن الكباس لم يتحرك ، فإن الشغل المبذول في هذا الجزء من الدورة يساوى صفرا . (لاحظ أن المساحة الموجودة تحت هذا الخط البياني تساوى صفرا كذلك) . ولكن الحرارة تنتزع من النظام في هذه الحالة ، إذن $\Delta Q = -\Delta Q_{BC}$ كما هو مبين .

الخطوة التالية من الدورة مبينة في الجزء د . الآن يبرد الغاز تحت ضغط ثابت ، ولذلك فإن الغاز ينكمش ، وعليه فإن ΔV سالب . ولهذا السبب يبذل النظام شغلا سالبا يساوى $-\Delta W_{CD}$ ، وهو يساوى المساحة المظللة المبينة في الجزء د . وحيث أن النظام يفقد حرارة في هذه الخطوة ، فإن $\Delta Q = -\Delta Q_{CD}$

وفي النهاية تستكمل الدورة بالخطوة المبينة في الجزء هـ . هنا يسخن الغاز مع حفظ الحجم ثابتا بوضع الأثقال على الكباس ، وعندئذ يزداد الضغط من D إلى A ولا يبذل النظام أى شغل في هذه العملية . ولكن الحرارة تضاف إلى النظام ، وعليه فإن $\Delta Q = \Delta Q_{DA}$.

الدورة الكاملة موضحة في الشكل ١٢ - ٧ و . لاحظ أن صافي الشغل المبذول بواسطة النظام هو ببساطة المساحة $\Delta W_{AB} - \Delta W_{CD}$ ، وهذه هي المساحة المظللة في الجزء و من الشكل . وفي هذه الحالة ، كما في جميع الحالات الأخرى :

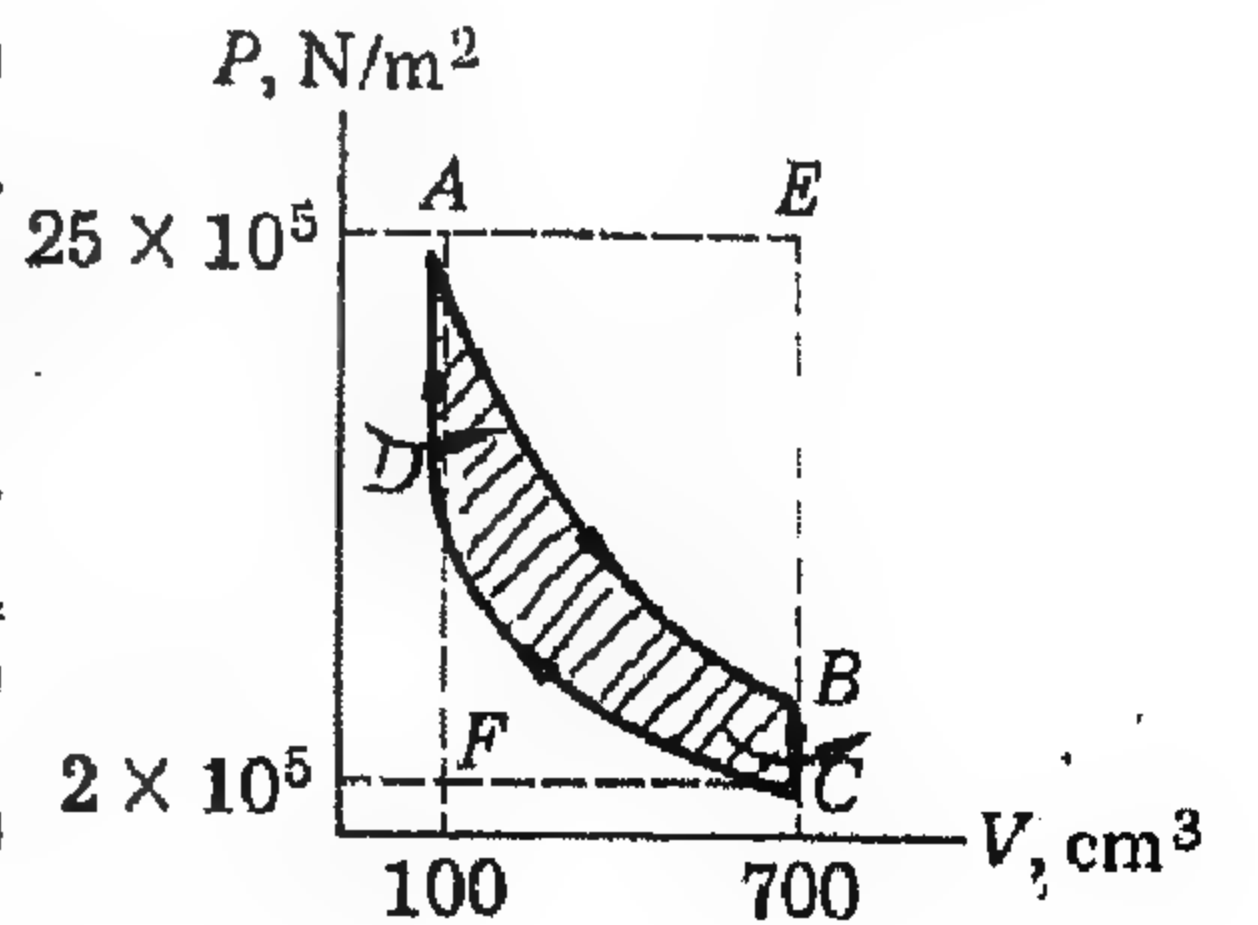
صافي شغل الخرج المبذول أثناء الدورة الدينامية الحرارية هو المساحة المحصورة داخل الدورة في الرسم البياني $P-V$ الذى يمثلها .

الشغل / دورة
هو المساحة
المحصورة داخل
الدورة

وهذه نتيجة هامة لأنها تسمح لنا بإيجاد شغل الخرج لمحرك أو آلة من الرسم البياني مباشرة .

شكل (١٢ - ٨)
دورة أوتو ، وهي الدورة
المثالية لمحرك الاحتراق
الداخلي .

مثال توضيحي ١٢ - ٤ : يمثل الشكل ١٢ - ٨ الرسم البياني $P-V$: المثالي لأحد اسطوانات محرك جازولين عادى . (هذه الدورة المثالية تسمى دورة أوتو) . تضغط الاسطوانة المليئة بالهواء من النقطة C أدياباتيا إلى النقطة D . ويشعل بخار الجازولين أثناء الجزء DA من الدورة . ولذلك فإن الحرارة تضاف بسرعة إلى الغاز دون تغير يذكر في الحجم . وبعد ذلك يتحرك الكباس إلى الخارج أثناء تمدد الغاز الساخن أدياباتيا في الجزء AB . ثم تطلق الحرارة إلى ماسورة العادم خلال الجزء BC ، وتتكرر العملية الأصلية بعد ذلك . بفرض أن المساحة المظللة ثلث المساحة الكلية $AECFA$ ، أوجد صافي شغل الخرج للأسطوانة لكل دورة .



طريقة الحل : صافي شغل الخرج يساوى المساحة المحصورة داخل الدورة . لنوجد أولا مساحة المستطيل $AECFA$.

$$\text{المساحة } AECFA = (23 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(600 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = 1380 \text{ J}$$

ولكن المساحة المظللة ، وهى تساوى صافي شغل الخرج . هى ثلث هذه المساحة . إذن صافي شغل الخرج لكل دورة هو 460 J .

١٢ - ٦ كفاءة المحرك (أو الآلة)

مع تفاقم مشكلة الطاقة التى يعانىها العالم حاليا ، يزداد قلق الإنسان على مصادر الطاقة المتاحة على الأرض . لذلك فانه يبحث عن طرق تمكنه من تقليل استهلاك الطاقة . وربما كان تحسين كفاءة المحركات المستخدمة فى سياراتنا وفى المركبات الأخرى إحدى الطرق الواضحة لتحقيق هذا الهدف . ولكن ، لسوء الحظ ، مطلبنا فيما يتعلق بكفاءة المحرك مقيد بشدة . ذلك لأن القانون الأول للديناميكا الحرارية يضع حدا للكفاءة الممكن تحقيقها . لنرى الآن ماهو هذا الحد .

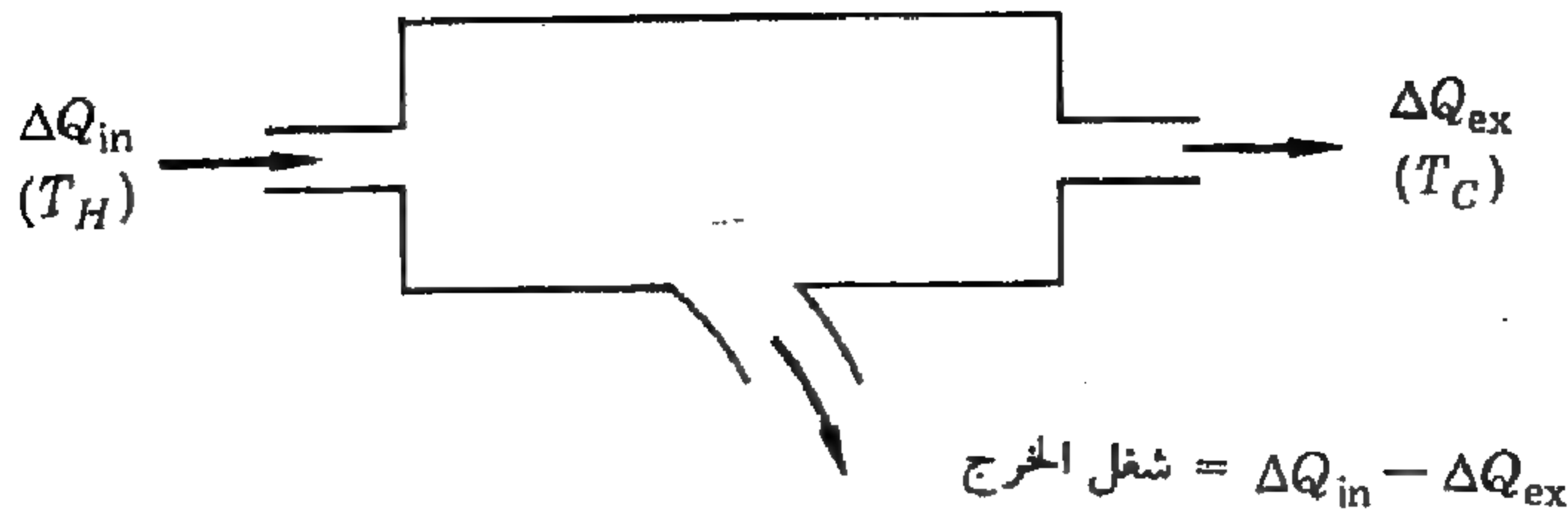
تعرف كفاءة المحرك بنفس الطريقة المستخدمة لتعريف كفاءة أى مكنة . إذن ، تعرف كفاءة المحرك بالمعادلة التالية :

$$\text{كفاءة} = \frac{\text{صافي شغل الخرج / دورة}}{\text{طاقة الدخل / دورة}}$$

ويعطى صافي شغل الخرج بالمساحة المحصورة داخل الدورة $P-V$ للمحرك . ولكننا لن نستخدم هذه القيمة فى حسابنا . وبدلا من ذلك سنقوم بحساب الكفاءة باستخدام القانون الأول للديناميكا الحرارية مباشرة .

اعتبر أى محرك يستخدم الوقود المحترق فى تشغيله . (المحرك الكهربى هو فى الواقع جزء من « المحرك » الأكبر الذى يحتوى على مولدات وحدة توليد القوى) . فالجازولين المحترق فى محرك الإحتراق الداخلى ، مثلا ، يزود النظام بالطاقة الحرارية ، وهذه هى طاقة دخل المحرك ، وسوف نفرض أن ΔQ_{in} هى طاقة الدخل لكل دورة من المحرك .

وفى فقد دائما جزء من حرارة الدخل هذه من المحرك بطريقة غير منتجة . فمثلا ، تحمل الغازات الساخنة المنطلقة من ماسورة عادم السيارة جزءا من الطاقة لاىستفاد به . علاوة على ذلك فإن فواقد الطاقة الاحتكاكية قد تكون هامة كذلك . وسوف نرمز للطاقة الكلية المفقودة نتيجة هذه العمليات بالرمز ΔQ_{ex} .



شكل (١٢ - ٩)
شغل الخرج للمحرك أصغر
دائما من طاقة الدخل بمقدار
يساوى حرارة العادم .

والآن سنقوم بتطبيق القانون الأول ، وهو في الحقيقة قانون بقاء الطاقة . في هذه الحالة صافي شغل الخرج المبذول بواسطة المحرك هو الفرق بين طاقة الدخل وطاقة العادم . (ويمثل هذا الشغل تخطيطيا عادة كما هو مبين في الشكل (١٢ - ٩) . إذن :

$$\Delta Q_{in} - \Delta Q_{ex} = \text{صافي شغل الخرج} / \text{دورة}$$

ولكن طاقة الدخل لكل دورة هي ببساطة ΔQ_{in} . ومن تعريف الكفاءة نجد أن :

$$\text{eff} = \frac{\Delta Q_{in} - \Delta Q_{ex}}{\Delta Q_{in}}$$

أو

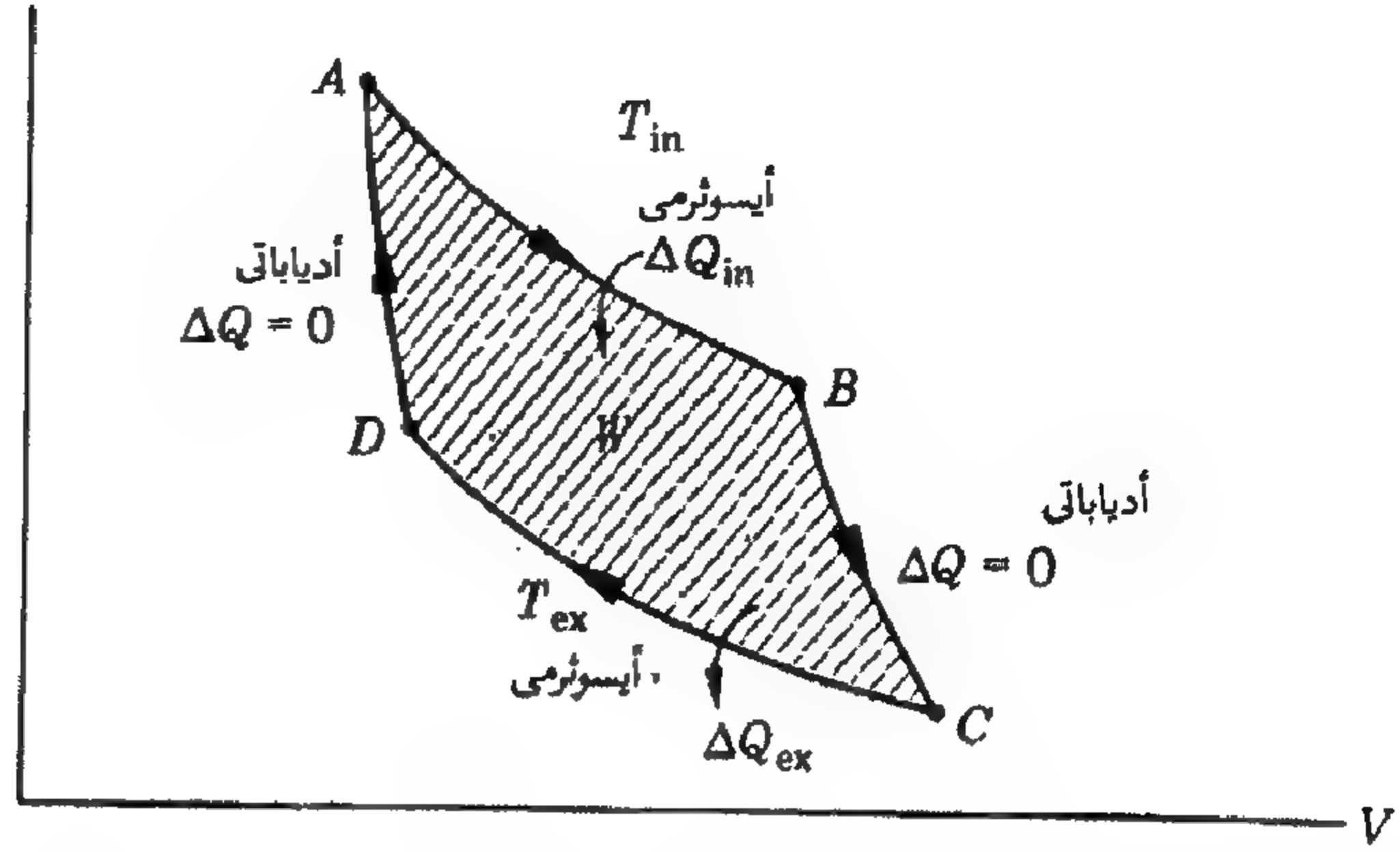
$$\text{eff} = 1 - \frac{\Delta Q_{ex}}{\Delta Q_{in}} \quad (١٢ - ٤)$$

لاحظ أن المعادلة (١٢ - ٤) تبين لنا أن الكفاءة أقل دائما من الوحدة (أو 100%) بمقدار $\Delta Q_{ex} / \Delta Q_{in}$. وقد نظن أن كل ما يجب عمله هو أن نصمم المحرك بحيث تكون الحرارة المفقودة في عمليات تصريف العادم صغيرة جدا ، ولكن هذا ليس بسيطا كما يبدو . وتكمن الصعوبة في أن الطاقة الحرارية يمكنها أن تبذل الشغل عندما تنتقل الحرارة من جسم ساخن إلى آخر بارد فقط . أى أن الشغل يبذل إذا كان سريان الحرارة موجودا فقط .

بناء على ماتقدم ، يمكنك أن تخمن أن الشغل الذي تستطيع أن تبذله كمية معينة من الحرارة يعتمد على فرق درجتى الحرارة التى تنتقل الحرارة بينهما . إذن ، كلما كان الفرق بين درجتى حرارة مدخل المحرك ومخرج تصريفه كبيرا ، كلما كانت كفاءة المحرك عالية ، وهذا صحيح بشكل عام . ولكن ثبت في النهاية أن فرق درجتى الحرارة المهم في هذه العملية هو الفرق بين درجتى حرارة أكثر الأجزاء ارتفاعا وأكثر الأجزاء انخفاضاً في درجة الحرارة في دورة المحرك .

ولكن الدورة $P-V$ لمعظم المحركات الحقيقية معقدة إلى حد كبير ، نتيجة لذلك تعتمد كفاءة المحرك بدرجة كبيرة على كيفية تصميم المحرك ذاته . ومع ذلك فقد أثبت

سادى كارنو فى عام ١٨٢٤ نظريا أن هناك محرك (دورة) معين يحقق أعلى كفاءة ممكنة . وهذه الدورة ، تسمى دورة كارنو ، مبينة فى الشكل ١٢ - ١٠ .



شكل (١٢ - ١٠)
دورة كارنو

أثبت كارنو أن النسبة $\Delta Q_{ex}/\Delta Q_{in}$ فى المعادلة (١٢ - ٤) تساوى النسبة بين درجتى الحرارة المقيالتين T_{ex}/T_{in} ، إذن ، تعطى كفاءة دورة كارنو بالعلاقة :

$$\text{eff} = 1 - \frac{T_{ex}}{T_{in}} \quad (١٢ - ٥) \quad \text{دورة كارنو}$$

بالإضافة إلى ذلك . أثبت كارنو أن المعادلة (١٢ - ٥) هى أعلى كفاءة ممكنة الكفاءة لأى محرك يعمل بين درجتى الحرارة T_{in} و T_{ex} . وعادة لا تكون درجة حرارة العادم أقل من درجة حرارة الجو ، أى حوالى 300 K . إذن ، لكي نحقق أعلى كفاءة ، يجب أن تكون درجة حرارة المائع المستخدم فى المحرك عالية جدا أثناء أكثر الأجزاء سخونة فى الدورة . وتحدد هذه الدرجة أساسا بالمادة المستعملة لبناء المحرك . ومع ذلك ، هناك عوامل محددة أخرى تجعل هذا العامل أقل أهمية . ويمثل الجدول ١٢ - ١ الكفاءات النموذجية للمحركات الحديثة . لاحظ أن القيم المدرجة بالجدول هى القيم القصوى وأنها تقريبية فقط .

مثال توضيحي ١٢ - ٥ : قدر أعلى كفاءة ممكنة للمحرك البخارى .

جدول (١٢ - ١)
كفاءات المحرك النمطية القصوى

المحرك	الكفاءة التقريبية ، %
محرك بخارى	15
توربين بخارى	35
محرك جازولينى	30
محرك ديزل	40

طريقة الحل . الغاز الساخن المستخدم في المحرك البخارى لتشغيل الكباس هو بخار الماء . وحيث أن الماء يغلى في درجة 373 K ، فإن ضغط البخار يرتفع بسرعة عند درجات الحرارة العالية . نتيجة لذلك تحدد درجة الحرارة العليا في الدورة بقوة غلاية البخار . لنفرض أن درجة حرارة البخار الداخل $T_{in} = 453 K$ (أى $180^\circ C$) . وأيضا ، لا يمكن أن تقل درجة حرارة العادم بسهولة عن درجة الحرارة المحيطة . لنفرض إذن أن هذه الدرجة هي $T_{ex} = 300 K$ (أى $27^\circ C$) إذن :

$$eff = 1 - \frac{T_{ex}}{T_{in}} = 1 - \frac{300}{453} = 0.34 \text{ or } 34\%$$

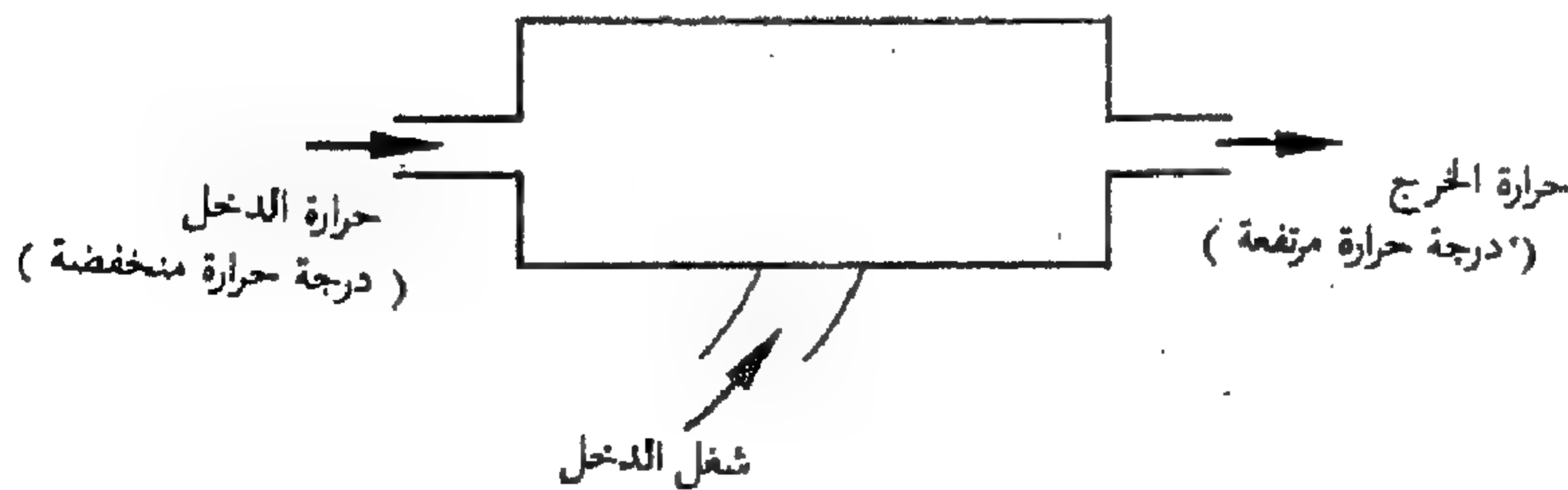
وعمليا قد تكون كفاءة المحرك البخارى ثلث هذه القيمة فقط . لاحظ أن حسابنا مبنى على أساس دورة كارنو ، وبالطبع فإن الدورة الحقيقية ستكون أقل كفاءة .

١٢ - المضخات الحرارية والمبردات

تستخدم المحركات الطاقة الحرارية لبذل الشغل . أما المبردات والمضخات الحرارية فإنها تقوم بالعملية العكسية تماما ، أى أنها تستخدم الشغل لنقل الحرارة من منطقة باردة إلى أخرى دافئة . ويمثل الشكل ١٢ - ١١ رسما تخطيطيا يوضح مسار الطاقة في مبرد ذى ضاغط . لاحظ أن الشغل يستخدم في نقل الطاقة الحرارية من منطقة باردة (داخل المبرد) إلى منطقة دافئة خارج المبرد . وفي هذه الحالة تسير الحرارة في عكس اتجاه سريانها الطبيعي . لذلك يلزم امداد النظام بالشغل من الخارج ليستمر سريان الحرارة في الاتجاه المبين . ونحن نعلم من القانون الأول أن :

$$\text{خرج الحرارة} = \text{دخل الحرارة} + \text{دخل الشغل}$$

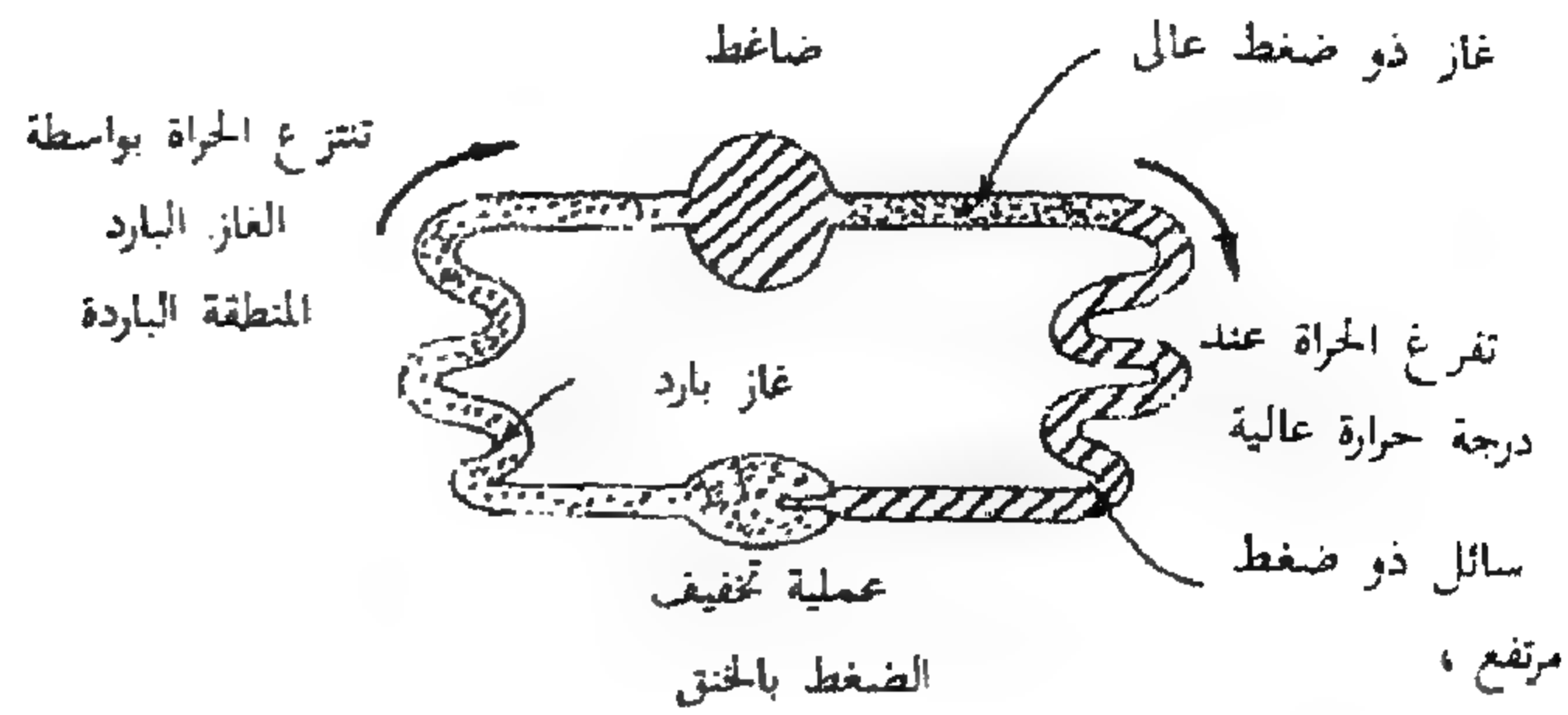
يعمل كثير من أجهزة التبريد بواسطة ضاغط يؤثر على مائع ، ويستخدم غاز الفريون* كثيرا كإائع . وهذا لأنه من الممكن إساليته في درجة حرارة الغرفة باستخدام



شكل (١٢ - ١١)
مضخة حرارية أو مبرد

* الفريون هو الاسم التجارى لثالى كلوروفلورو الميثان والمركبات المشابهة .

ضغط معتدل. لنرجع إلى الشكل ١٢ - ١٢ لكي نفهم العمليات التي تتم في المضخات الحرارية أو المبردات .



شكل (١٢ - ١٢)
بعض تفاصيل المضخة
الحرارية أو المبرد المحتوية على
ضاغط .

يستخدم الضاغط المبين في أعلى الشكل لضغط غاز الفريون . وحيث أن الضاغط يبذل شغلا على الفريون فإن غاز الفريون يسخن عند انضغاطه . يبرد هذا الغاز الساخن المضغوط ضغطا شديدا بعد ذلك بامراره في مجموعة أنابيب متصلة مسطرة عليها مروحة أو يدور حولها الهواء (عندما يكون المبرد أو مكيف الهواء دائرا يمكنك أن تشعر باندفاع الهواء الساخن من الجزء غير المبرد فيه . هذا الهواء ينقل الحرارة من مجموعة الأنابيب المتصلة الموجودة في أيمن الشكل) . وعندما يبرد الفريون قليلا تحت هذا الضغط العالي فإنه يتكثف ويتحول إلى سائل ، ثم يدخل هذا السائل في نظام نفثي يعمل كصمام خائق .

لعلك تذكر أن عملية تخفيف الضغط بالحقن تتم بواسطة تمدد المائع تمدا فجائيا في منطقة الضغط . نتيجة لذلك يبرد الفريون في هذه الحالة بدرجة كبيرة عند خروجه من المنفذ كغاز ذي ضغط منخفض . يمرر هذا الغاز البارد بعد ذلك في مجموعة الأنابيب المتصلة الموجودة في صندوق تبريد المبرد . أو ، في حالة وحدة تبريد الهواء ، يدفع الهواء من خارج المبنى إلى داخل الغرفة مارا بهذه الأنابيب . نتيجة لذلك يسخن الغاز البارد قليلا أثناء تبريده للمنطقة القريبة من مجموعة أنابيب التبريد . بعدئذ يعود هذا الغاز إلى الضاغط مرة ثانية حيث تتكرر العملية بأكملها .

تقدر وحدات التبريد عادة بالطن ، وهذه الوحدة لقياس التبريد وحدة عملية بحتة . وتعرف وحدة التبريد 1 ton بأنها كمية « التبريد » التي تستطيع تحويل 1 ton من الماء في درجة 0°C إلى ثلج عند نفس درجة الحرارة في زمن تشغيل قدره 1 day . أو ، باستخدام الوحدات الأساسية للحرارة :

$$1 \text{ ton of refrigeration} = 12,000 \text{ Btu/h} = 3513 \text{ J/s} = 840 \text{ cal/s}$$

من هذا نرى أن وحدة التبريد 1 ton يجب أن تكون قادرة على تجميد حوالي 10 g من الماء في الثانية . وعمليا ، يؤدي انتقال الحرارة خلال الماء إلى نقص هذا المعدل بدرجة كبيرة .

يمكن استخدام المضخات الحرارية في تدفئة المباني . فحيث أن المضخة الحرارية تقوم بضخ الحرارة من منطقة باردة إلى منطقة دافئة ، يمكنها بالتالي أن تضخ الحرارة من الهواء الطلق البارد إلى داخل المنزل . وفي الحقيقة فإن كثيرا من أنظمة التبريد المنزلية من النوع ذى التأثير العكسى . ففي الشتاء تعكس وحدة التبريد بحيث تقوم بتدفئة المنزل بدلا من تبريده . ويسخن الهواء المندفَع إلى داخل المنزل بانتزاع الحرارة من الخارج ومع ذلك . يجدر بنا أن نشير إلى أن استخدام الأفران والتسخين الكهربائى قد أصبح الآن أفضل من الناحية الاقتصادية وخاصة في المناطق التى تستمر فيها درجة حرارة الهواء الخارجى منخفضة لفترات طويلة .

رأينا مما سبق أن المضخات الحرارية تقوم بنقل الحرارة في اتجاه معاكس للاتجاه العادى لانتقال الحرارة ولكى يتحقق ذلك لابد من استخدام مصدر طاقة خارجى لبذل الشغل . ذلك أن الميل الطبيعى في الكون هو أن تنتقل الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد، وقد أوضحنا سبب ذلك سابقا على أساس التركيب الجزيئى للمادة . وتعتبر حقيقة أن هناك اتجاها مفضلا للانتقال الطبيعى للطاقة مبداء أساسيا في هذا الكون الذى نعيش فيه . وهذه الظاهرة ملخصة في القانون الثانى للديناميكا الحرارية . وسوف ندرس هذا القانون ونتائج في الأجزاء التالية .

١٢ - ٨ القانون الثانى للديناميكا الحرارية

علق بعضهم ذات مرة على الكون فقال إن « الأحوال تسير من حسن إلى سئ إلى أسوأ » ، وهذا يلخص القانون الثانى للديناميكا بشكل فج جدا . وكما رأينا فإن القانون الأول هو صيغة لبقاء الطاقة ، ولكنه لا يذكر أى شئ عن طريقة سير الحوادث في الكون . فالطاقة محفوظة عندما يسقط حجر على الأرض ، إذ تتحول طاقة وضعه الثقالية إلى طاقة حركة . وعندما يصطدم الحجر بالأرض ويصل إلى السكون تتحول طاقة حركته إلى طاقة حرارية . ومع ذلك فإن حجرا مستقرا على الأرض لا يستطيع أبدا أن يقوم بتحويل الطاقة الحرارية الموجودة فيه وبجانبه إلى طاقة حركة ليطلق إلى أعلى في الهواء . وبالرغم من أن القانون الأول يحكم مثل هذه الإمكانيات أيضا ، لأن الطاقة محفوظة في هذه العملية العكسية ، إلا أن هذه العملية العكسية لا تحدث تلقائيا .

هناك عمليات كثيرة أخرى لا يحكمها القانون الأول . ولكنها لا تحدث . فالماء يتبخر من الطبق ، ولكن البخار الموجود في الهواء لا يتكثف تلقائيا في الطبق . كذلك تحلل الجثة وتتحول إلى تراب ، ولكن عناصر الأرض لا تقوم بتكوين الجسم تلقائيا في العملية العكسية . إذن ، للطبيعة اتجاه مفضل لسير الأحداث التلقائية . ويحدد هذا الاتجاه بالقانون الثانى للديناميكا الحرارية .

منذ أن تبلورت الديناميكا الحرارية كعلم متكامل وحتى الآن وضعت عدة صيغ متكافئة تماما للقانون الثاني . وتلخص إحدى الصيغ الأولى للقانون الثاني حقيقة أن الحرارة تنتقل تلقائيا من الجسم الساخن إلى البارد :

القانون الثاني
للدناميكا
الحرارية

تنتقل الحرارة تلقائيا من الجسم الأكثر سخونة إلى الجسم الأقل سخونة وليس العكس . ولهذا يستحيل على النظام الدورى أن ينقل الحرارة من جسم درجة حرارته منخفضة إلى جسم درجة حرارته مرتفعة بشكل غير محدود ما لم يبذل شغل خارجى على النظام .

وتتفق هذه الصيغة مع ما تعلمناه من المحركات والمبردات . فلكى يعمل المبرد يجب استخدام مصدر خارجى للطاقة . ذلك أنه إذا أريد نقل الحرارة من منطقة باردة إلى أخرى أكثر دفئا يلزم بذل شغل خارجى لتحقيق ذلك . وفى حالة المحرك يجب أن يوجد فرق فى درجة الحرارة . فحيث أن كفاءة المحرك تعطى بالكمية $1 - T_{ex}/T_{in}$ ، فإن الكفاءة تصبح صفرا إذا كانت درجتا الحرارة متساويتين .

وكما نرى ، يخبرنا القانون الثانى أن من المستحيل الاستفادة من الطاقة الحرارية إلا إذا انتقلت إلى منطقة درجة حرارتها منخفضة .

فمثلا ، تحتوى مياه المحيطات على كمية هائلة من الطاقة الحرارية . ولكننا لانستطيع استخدام هذه الطاقة إلا إذا وجد مكان أبرد تستطيع الحرارة أن تنتقل اليه . نتيجة لذلك ، يمكننا أن نقول أن الطاقة الحرارية عديمة الفائدة لنا فيما يتعلق بجميع الأغراض العادية . وسوف نستكشف السبب الأساسى لانعدام فائدة الحرارة الكامنة فى مياه المحيطات فى الجزء التالى .

١٢ - ٩ النظام مقابل عدم النظام (الفوضى)

يعلم كل مقامر أن ترجيح حدث معين يكون أفضل إذا كان الحدث يتحقق بطرق مختلفة كثيرة . ولتوضيح ذلك ، اعتبر لعبة تلقى فيها خمس قطع متماثلة من العملة على منضدة بعد أن تهز جيدا . هناك ستة أحداث فقط يمكن أن تتحقق نتيجة لإلقاء هذه القطع ، وهى كالتالى :

الحدث	عدد مرات ظهور الصورة على الوجه العلوى	عدد مرات ظهور الكتابة على الوجه العلوى
1	0	5
2	1	4
3	2	3
4	3	2
5	4	1
6	5	0

وكتخمين أولى ، قد يبدو أن احتمال وقوع كل من هذه الاحداث متساو . ولكن هذا ليس صحيحا . والسبب هو أن هناك طريقة واحدة لحدوث الحدث 1 أو الحدث 6 . ففي حالة الحدث 1 يجب أن تظهر الكتابة على الوجه العلوى لجميع قطع العملة بلا استثناء . كذلك في حالة الحدث 6 يجب أن تظهر الصورة على الوجه العلوى لجميع قطع العملات بلا استثناء أيضا .

من ناحية أخرى . هناك في الحقيقة خمس طرق مختلفة يمكن أن يحدث بها الحدث 2 . فإذا رمزنا لقطع العملة الخمس بالحروف A ، B ، C ، D ، E فإن هذه الطرق تكون كالتالى :

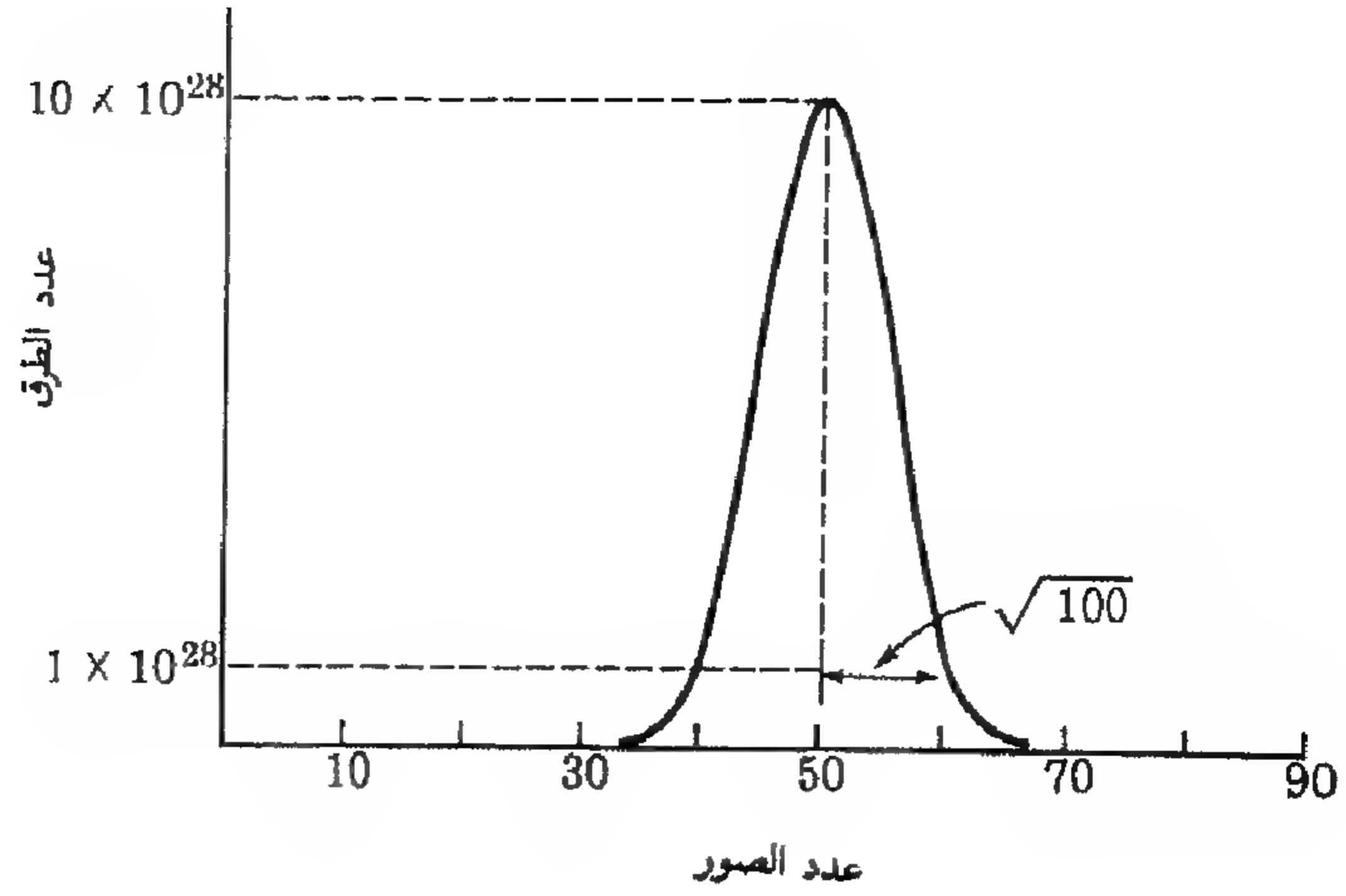
طرق الحصول على صورة واحدة						
الطريقة	A	B	C	D	E	قطعة العملة
1	H	T	T	T	T	
2	T	H	T	T	T	
3	T	T	H	T	T	
4	T	T	T	H	T	
5	T	T	T	T	H	

وحيث أن عدد الطرق التى يمكن أن تحقق الحدث 2 أكبر خمس مرات من عدد الطرق التى يمكن أن تحقق الحدث 1 ، فإن احتمال حدوث الحدث 2 أكبر من احتمال حدوث الحدث 1 خمس مرات . وأيضا يمكن أن يتحقق الحدث 5 بخمس طرق مختلفة . ونتيجة لذلك فإن احتمال حدوث الحدثين 2 ، 5 متساو ، وواضح أن احتمال حدوث كل منهما أكبر خمس مرات من احتمال حدوث الحدث 1 أو 6 .

بنفس الطريقة يمكننا إثبات أن احتمال حدوث الحدثين 3 و 4 متساويان ، وأن كلا من هذين الحدثين يمكن أن يتحقق بعشر طرق مختلفة . إذن احتمال حدوث الحدثين 3 و 4 ضعف احتمال حدوث الحدثين 2 و 5 وعشرة أضعاف احتمال حدوث الحدثين 1 و 6 . فإذا كنت مقامرا ، فإن من الواضح لك الآن على أى حدث يجب أن تضع نقودك ، إذا لم يكن هناك تأرجح معين .

يمكننا تعميم ذلك على أى موقف يستخدم فيه عدد أكبر من قطع العملة . لنفرض أننا ألقينا 100 قطعة عملة وليس 5 . في هذه الحالة ، كما في الحالة السابقة ، هناك طريقة واحدة لأن تظهر الصورة (أو الكتابة) على الوجه العلوى لجميع القطع . ولكن عدد الطرق التى يمكن أن تحدث بها التوافقيات الأخرى يصبح كبيرا بدرجة غير معقولة في هذه الحالة ، وهذا موضح في الشكل ١٢ - ١٣ . لاحظ أن عدد الطرق التى يمكن أن تظهر بها 50 صورة على الوجه العلوى هو حوالى 10×10^{28} . وكما ترى ، فإن أرجحية ظهور الصورة (أو الكتابة) على الوجه العلوى لجميع القطع صغيرة جدا ويمكن إهمالها .

شكل (١٢ - ١٣)
عدد الطرق التي يمكن بها
الحصول على العدد المبين من
الصور عند إلقاء 100 قطعة
عملة .



وفي الحقيقة فإن العدد الكلي للطرق التي تحدث بها جميع التوافقيات الممكنة من الصورة أو الكتابة هو حوالي 1×10^{30} . إذن ، احتمال ظهور الصورة على الوجه العلوي لجميع القطع هو 1 من 10^{30} . فإذا أُلقيت القطع مرة في كل 10 s لمدة 10^{22} yr فإن فرصتها لأن تظهر على الوجه العلوي لجميع القطع مرة واحدة ستكون حوالي 10% . ولجميع الأغراض العملية تعتبر فرصة ظهور الصورة على الوجه العلوي لجميع القطع صفراً . وكما نرى من الشكل ١٢ - ١٣ فإن الاحتمال الوحيد الممكن حدوثه حقيقة هو أن تظهر أعداد متساوية من الصورة والكتابة على الأوجه العلوية للقطع .

وإذا اعتبرنا 10^6 قطعة بدلا من 10^2 فإن الموقف يصبح أكثر تعقيدا . ولكن يمكننا تلخيص جميع هذه النتائج بطريقة بسيطة جدا . لاحظ من الشكل ١٢ - ١٣ أن الخط البياني يقل إلى حوالي عشر قيمته العظمى عند العددين التاليين للصور : 40 و 60 ولكي نعطي تقديرا لاتساع الذروة ، يمكننا أن نقول أنها تمتد من (10-50) إلى (50+10) أي أنك إذا أُلقيت 100 قطعة فإن عدد الصور التي يجب أن تظهر على الوجه العلوي هو حوالي 50 ± 10 . أما النتيجة العامة فهي كالتالي :

إذا أُلقي شخص عددا من قطع العملة قدره N ، فإن العدد المتوقع من الصور سيكون حوالي * :

$$\frac{N}{2} \pm \sqrt{N}$$

* بدقة ، إذا كان N كبيرا فإن عدد الصور سوف يقع في هذا المدى بنسبة 95.3%

وفي حالة 10^6 قطعة عملة يجب أن نتوقع ظهور عدد قدره $500,000 \pm 1000$ على الوجه العلوى . لاحظ أن هذا التقدير دقيق جدا ، وهو يبين لنا أن العدد المتوقع من الصور يقع بين 501,000 و 499,000 ، وهو مدى ضيق جدا في الواقع . وكما هو واضح ، عندما يصبح عدد قطع العملة كبيرا جدا ، سنجد أن الانحراف المئوى عن المتوسط صغير جدا .



شكل (١٢ - ١٤)

ما هو احتمال أن تظهر جميع الجزيئات في أحد جانبي الصندوق ؟

هذا المثال عن قطع العملة هو مثال نموذجي لما يحدث عموما في الكون الذى نعيش فيه . فعندما تترك الأحداث لتتم بنفسها دون تدخل خارجي فإنها تحدث بالصدفة ولذلك فإن قوانين الاحتمال التى تنطبق على قطع العملة تنطبق كذلك على هذه المواقف . فمثلا ، لنفرض أن لديك صندوقا يحتوى على جزيئات غازية كما هو موضح في الشكل ١٢ - ١٤ ، ولنفرض أن عدد الجزيئات في الصندوق هو 10^{20} . (ملحوظة : تركيز الجزيئات في الهواء يساوى حوالى 3×10^{19} molecules/cm³) . ونحن نسأل الآن : ما هو الفرص لأن تتكدس جميع هذه الجزيئات في أحد نصفي الصندوق ؟

يمكننا توضيح هذا الموقف بسهولة بالاستعانة بالنتائج التى توصلنا اليها في مثال قطع العملة . ولكي نجعل الموقفين متشابهين ، لنفرض أن الجزيئات الموجودة في الجانب الأيسر من الصندوق هي جزيئات « صورة » ، وأن الجزيئات الموجودة في الجانب الأيمن هي جزيئات « كتابة » . وتبين لنا النتيجة العامة التى توصلنا اليها سابقا أن عدد جزيئات « الصورة » يساوى حوالى $N/2 \pm \sqrt{N}$ وفي هذه الحالة يكون عدد جزيئات « الصورة » حوالى :

$$50,000,000,000,000,000,000 \pm 10,000,000,000$$

لاحظ أن الانحراف المتوقع صغير جدا ، إذ يبلغ فقط $10^{10}/5 \times 10^{19}$ أو حوالى جزء واحد في كل 5 بليون جزء . ولهذا يمكننا أن نعتبر أن كلا من نصفي الصندوق يحتوى عمليا على نفس العدد من الجزيئات . وبالطبع ليست هناك أى فرصة على الإطلاق لأن تتحرك الجزيئات تلقائيا لتتكدس في احدى جانبي الصندوق .

وهذه الاعتبارات ذات أهمية أساسية وجوهرية في جميع العمليات التلقائية ، ويمكننا على أساسها أن نتنبأ بأن الحركة الحرارية (أو أى اضطراب عشوائى آخر) تغير حالة النظام الدينامي الحرارى من النظام إلى العوضى . وكمثال تقريبي لذلك ، اعتبر حالة قطع العملة المائة مرة ثانية . لنفرض أننا رتبنا هذه القطع جميعا بحيث كانت الصور إلى أعلى . يقال عندئذ أنها على درجة عالية من النظام . لنحركها الآن نوعا معينا من الحركة شبيها بالحركة الحرارية العشوائية بأن نرجها . عندئذ سوف يختل النظام بسرعة ولن تعود قطع العملة إلى حالة النظام الابتدائية أبدا .

بالمثل في حالة جزيئات الغاز في الصندوق المبين في الشكل ١٢ - ١٤ . لنفرض أننا رتبنا النظام بوضع جميع الجزيئات في أحد جانبي الصندوق . ولكن إذا سمحنا للجزيئات بأن تتحرك حركة حرارية تلقائيا فإنها ستصبح غير مرتبة وتملأ الصندوق كله ، ولن تعود تلقائيا إلى حالة الترتيب الابتدائية أبدا .

ويعتبر مفهوم النظام والفوضى أساسيين في هذه المناقشة . ويمكننا مقارنة درجة فوضى حالتين بطريقة بسيطة . فإذا كانت الحالة تحدث بطريقة واحدة فقط ، فإنها تكون حالة عالية النظام ، وفي مثل هذه الحالة يجب أن يوضع كل جزيء (أو جسيم آخر) بطريقة واحدة مضبوطة . أما حالة الفوضى فإنها يمكن أن تتحقق بطرق كثيرة . فإذا أخذنا هذه الحقائق في الاعتبار ، يمكننا أن نجد علاقة بين درجة الفوضى واحتمال (أو عدد طرق) تحقيق الحالة . وعليه فإن حالة أعلى فوضى هي الحالة الأكثر احتمالا ، إذا أنها تحدث بأكبر عدد من الطرق . فمثلا ، احتمال سقوط عدد N من قطع العملة بحيث تظهر الصورة على جميع الأوجه العليا صغيرة جدا ، ومن ثم فإن هذه الحالة منخفضة الفوضى جدا . وقد رأينا مما سبق أن الأنظمة تتحرك تلقائيا تجاه الحالات عالية الفوضى .

هناك أمثلة كثيرة يمكن أن نسوقها لتوضيح هذا النوع من السلوك . ويستنتج منها أن النظام المكون من عدد كبير من الجزيئات يتبع القانون التالي :

صورة أخرى للقانون
الثاني

إذا سمح للنظام بالتغير تلقائيا من حالة إلى أخرى ، فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد - أو ، في أحسن الأحوال ، لا تقل - درجة الفوضى فيه .

وهذا القانون الطبيعي ، الذي ينطبق على الأعداد الكبيرة من الجزيئات ، هو صورة بديلة للقانون الثاني للديناميكا الحرارية . وسوف نرى في الجزء التالي أن هناك علاوة على ذلك طريقة أخرى لصياغة هذا القانون .

١٢ - ١٠ الانتروبيا

يمكن التوصل إلى مضموني النظام والفوضى بطريقتين مختلفتين تماما . وقد عرف منذ وقت مبكر في تاريخ الديناميكا الحرارية أن هناك كمية تسمى الانتروبيا ذات فائدة كبيرة في الحسابات الدينامية الحرارية ، وتعرف هذه الكمية بدلالة سريان الحرارة ودرجة الحرارة المطلقة . وينطبق تعريف الانتروبيا على الأنظمة التي تعاني تغيرا انعكاسيا في الحالة . (طبقا للتعريف ، التغير الانعكاسي هو تغير يحدث بطريقتين متماثلتين في الاتجاهين الأمامي والخلفي) فمثلا ، عندما يحدث التغير انعكاسيا من الحالة A إلى الحالة B . تأخذ متغيرات حالة النظام قيما معينة في كل

خطوة من خطوات التغير . وفي العملية العكسية ، أى عندما يحدث التغير من الحالة B إلى الحالة A تكرر متغيرات الحالة نفس هذه الخطوات ولكن بترتيب عكسي .

يمثل التغير في انتروپيا النظام بالرمز ΔS . وعند الانتقال من الحالة A إلى B في عملية انعكاسية ، تنتقل كمية من الحرارة ΔQ إلى النظام عند درجة الحرارة المطلقة T ، وعندئذ يكون التغير في انتروپيا النظام كالتالى :

تغير الانتروپيا

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (١٢ - ٦)$$

وكما نرى ، فإن الكمية ΔS تكون موجبة (أى أن النظام يكتسب انتروپيا ، إذا كانت الحرارة تنتقل إلى النظام . لاحظ أن T هى درجة الحرارة المطلقة .

علاوة على ذلك ، يمكننا أن نثبت أن الانتروپيا متغير حالة . فعند الظروف المتماثلة تكون قيمة الانتروپيا ثابتة دائما . أى أن الانتروپيا تشبه تماما P ، V ، T في هذا الشأن . وحيث أن الانتروپيا متغير حالة ، من المفيد إذن استخدام هذه الكمية في الديناميكا الحرارية لوصف الأنظمة والعمليات .

وقبل أن نستخدم الانتروپيا على نطاق واسع في الديناميكا الحرارية ، قدم فرع الكيمياء والفيزياء المعروف باسم الميكانيكا الإحصائية رؤية أخرى لهذه الكمية . ففى علم الميكانيكا الإحصائية يوصف سلوك الغازات والسوائل والجوامد بدلالة السلوك الإحصائى للذرات والجزيئات . وتعتبر النظرية الحركية للغازات ، على سبيل المثال ، جزءا من الميكانيكا الإحصائية . وقد ناقشنا فى الجزء السابق سلوك الجزيئات من وجهة نظر الميكانيكا الإحصائية .

وبعد سنوات من العمل الدائب أدت أبحاث ونتائج بولتزمان وجيبس وكثيرين آخرين إلى توحيد الديناميكا الحرارية والميكانيكا الإحصائية . وقد كان تفسير معنى الانتروپيا بدلالة النظام والفوضى واحدا من النتائج الأساسية لهذا التوحيد ، وكانت النتيجة النهائية كالتالى .

لنفرض أن لدينا نظاما يمكنه أن يصل إلى حالة معينة بطرق مختلفة عددها Ω حيث Ω هو حرف أوميجا الكبيرة . (فى حالة النظام المكون من 100 قطعة عملة ، $\Omega = 1$ فى حالة ظهور الصورة على الوجه العلوى لجميع القطع ، $10^{29} \approx \Omega$ فى حالة ظهور أعداد متساوية من الصورة والكتابة على الأوجه العلوية) . وقد اثبت أن انتروپيا النظام هى :

حيث تمثل \ln اللوغاريتم الطبيعي ، k ثابت بولتزمان .

لاحظ ماتبينه لنا المعادلة (١٢ - ٧) . فإذا كانت حالة النظام يمكن أن تتحقق بطريقة واحدة فقط فإن $\Omega = 1$. ولكن لوغاريتم 1 يساوى صفرا ، إذن انتروبيا هذه الحالة غير المحتملة بدرجة عالية تساوى صفرا . أما إذا كانت الحالة يمكن أن تتحقق بطرق كثيرة ، فإن Ω ستكون كبيرة . إذن انتروبيا هذه الحالة المحتملة بدرجة عالية كبيرة .

لنتذكر الآن أن الحالة عالية النظام يمكن أن تتحقق بعدد صغير من الطرق ، ولكن الحالة عالية الفوضى يمكن أن تتحقق بعدد كبير من الطرق . علاوة على ذلك تبين لنا المعادلة (١٢ - ٧) أن الانتروبيا مقياس للفوضى . فكلما كانت حالة النظام عالية الفوضى ، كلما كانت انتروبيا النظام كبيرة . وحيث أن الانتروبيا متغير حالة يقيس فوضى النظام ، فإن من الممكن أن نعيد صياغة القانون الثاني للديناميكا الحرارية بطريقة أخرى :

القانون الثاني
بدلالة الانتروبيا

عندما تتغير حالة النظام المعزول . فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد الانتروبيا ، أو تظل ثابتة في أحسن الاحوال .

وبين المثال التوضيحي التالي كيف يمكن حساب التغير في الانتروبيا في عملية .
مثال توضيحي ١٢ - ٦ : مامقدار التغير في الانتروبيا عند انصهار مكعب من الثلج كتلته 20 g في درجة 0°C ؟
طريقة الحل . من المعادلة (١٢ - ٦) :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

لاحظ أن T هي درجة الحرارة المطلقة ، وفي هذه الحالة $T = 273 \text{ K}$. وحيث أن كمية الحرارة اللازمة لصهر جرام واحد من الثلج هي 80 cal ، إذن :

$$\Delta Q = (20 \text{ g})(80 \text{ cal/g})(4.184 \text{ J/cal}) \approx 6700 \text{ J}$$

ومنه :

$$\Delta S = \frac{6700 \text{ J}}{273 \text{ K}} = 24.5 \text{ J/K}$$

لاحظ أن الانتروبيا قد ازدادت عندما تحول الثلج إلى ماء ، وتعتبر هذه الزيادة مقياس للزيادة في فوضى جزيئات الماء H_2O .

١٢ - ١١ الموت الحرارى للكون

تحدث جميع التغيرات التلقائية بحيث تزداد الفوضى فى الكون . وهذه ببساطة هى صيغة للقانون الثانى مطبقة على الكون ككل . وسنرى فى الفصل التاسع والعشرين أن الكون كله - طبقا لأحدث النظريات - كان فى يوم من الأيام كرة واحدة هائلة الحجم . يبلغ قطرها عشرة أضعاف قطر الشمس وفى ذلك الوقت . أى فى بداية الزمن ، كان الكون عبارة عن كرة من الطاقة ساخنة بدرجة لا يمكن تصورها . وخلال بلايين السنين التى مرت منذ ذلك الحين تمدد الكون ادياباتيا مع انطلاق حوافه الخارجية فى الفضاء بسرعات عالية تقترب من سرعة الضوء .

وتنطبق قوانين الديناميكا الحرارية على هذه العملية التى استغرقت حوالى ١١ بليون سنة . وفى خلال ذلك الزمن كانت الطاقة تنتقل باستمرار من المناطق الساخنة إلى الباردة وبالطبع كان ذلك مصحوبا بزيادة الفوضى والانتروبيا فى الكون وكانت النتيجة الحتمية لذلك أن أصبحت الطاقة الحرارية ، وجميع أنواع الطاقة عموما ، أقل نفعا فى المتوسط . هذا لأن درجة الحرارة الابتدائية لهذه الكرة النارية كانت تنخفض باستمرار . ومع ذلك فلا زالت هناك بقع ساخنة محلية فى مواضع معينة فى الشمس والنجوم . إلا أن درجة حرارة الجزء الأعظم من الكون قد انخفضت إلى حد كبير تحت درجات الحرارة المعتادة ، إذ يصل متوسط درجة حرارة الغاز فى أجواء الفضاء البعيدة إلى حوالى 3 K .

ولكننا محظوظون على الأرض . فلا زالت الشمس القريبة من كوكبنا تمدنا بفيض هائل من الطاقة . وتنتقل الطاقة من الشمس الساخنة إلينا بالإشعاع . ونحن نستفيد من هذه الطاقة الإشعاعية فى زراعة النباتات ، وهذه بدورها تستخدم كمصادر للطاقة اللازمة لنا وللمخلوقات المختلفة التى تعيش على الأرض . وكما وضعنا سابقا فإن الشمس هى المصدر الأساسى للطاقة التى نستخدمها ، باستثناء الوقود النووى . لاحظ أن فائدة الشمس هى نتيجة لدرجة حرارتها العالية جدا . وعندما تبرد الشمس فإنها سوف تشع كمية أقل من الطاقة ، ومن المتوقع أن تفقد الشمس مصدرها الأساسى للطاقة خلال بلايين قليلة من السنين .

وخلال ذلك الزمن سوف تزداد انتروبيا الكون باستمرار ، وفى نفس الوقت سوف تستمر الشمس والأجسام الساخنة الأخرى فى فقد الانتروبيا بمعدل قدرة $\Delta Q/T_h$. حيث ΔQ كمية الحرارة التى يفقدها الجسم الساخن فى الثانية عند درجة حرارة قدرها T_h وبالرغم من أن الأجزاء الباردة فى الكون سوف تستقبل هذه الطاقة ، فإنها سوف تمتص هذه الحرارة عند درجة حرارة أقل هى T_c . نتيجة لذلك سوف تكتسب

هذه الاجسام الباردة كمية من الانتروبيا $\Delta Q/T_c$ أكبر من كمية الانتروبيا التي يفقدها الجسم الساخن $\Delta Q/T_h$. إذن ، سوف تستمر انتروبيا وفوضى الكون في الزيادة نتيجة لانخفاض درجة حرارة الأجسام الساخنة وارتفاع درجة حرارة الأجسام الباردة .

ويمكننا أن نتخيل ما سوف يحدث عندما تتساوى درجات حرارة جميع الأجسام في الكون . عندئذ لن يحدث أى انتقال للحرارة ، وسوف تصل الفوضى (والانتروبيا) في الكون إلى القيمة القصوى . وبالرغم من أن الطاقة الأصلية للكون لازالت ثابتة ، فإن الطاقة سوف تصبح عديمة الفائدة . وعندئذ لن تنمو النباتات لعدم وجود جسم ساخن يمدّها بالضوء ، ولن تعمل المحركات لعدم وجود مكان بارد يمكن تصريف الحرارة اليه . أى أن الحياة سوف تتوقف تماما في كل مكان في الكون . وفي هذه الحالة يكون الكون قد وصل إلى ما يعرف بالموت الحرارى .

ولحسن الحظ فإن هذا لن يحدث لبلايين قادمة من السنين . وفي الحقيقة فإننا لسنا متأكدين اطلاقا من أن هذا قد يحدث في أى وقت . وسترى في الفصل التاسع والعشرين أن هناك احتمالا لأن ينكمش الكون في المستقبل مرة ثانية ليصبح كرة نارية ملتهبة كما كان في البداية . ولكن هذه قصة أخرى، سوف نؤجل مناقشتها إلى الفصل الأخير من هذا الكتاب .

ملخص

الديناميكا الحرارية هي ذلك النوع من العلم الذى يصف سلوك المادة بدلالة متغيرات حالتها ، وهي أساسا الضغط ودرجة الحرارة والحجم والطاقة الداخلية والانتروبيا . متغير الحالة هو أية كمية تعتمد فقط على الحالة الماكروسكوبية لأى نظام فيزيائى . تحت الشروط الماكروسكوبية المتماثلة ، يكون لكل متغير من متغيرات الحالة قيمة محددة واحدة . الحرارة والشغل ليسا متغيرى حالة .

القانون الأول للديناميكا الحرارية هو صيغة لقانون بقاء الطاقة . يمكن صياغة هذا القانون في صورة معادلة كإلى : إذا كانت الحرارة ΔQ تنتقل إلى نظام ما عندما يبذل هذا النظام شغلا قدره ΔW فإن هاتين الكميتين ترتبطان بالتغير في الطاقة الداخلية للنظام بالعلاقة :

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta W$$

عندما يتغير حجم نظام بمقدار ΔV تحت ضغط خارجى قدره P فإن هذا النظام يبذل شغلا قدره $P \Delta V$. إذن $\Delta W = P \Delta V$ الشغل المبذول بواسطة النظام أثناء التغير يساوى المساحة الموجودة تحت الخط البيانى الذى يمثل هذا التغير في الرسم البيانى $P-V$ للنظام . إذا كان النظام يقوم بتغير دورى ، فإن صافى الشغل المبذول بواسطة النظام أثناء الدورة يساوى المساحة المحصورة داخل الدورة في الرسم البيانى $P-V$

العملية الايسوثرمية هي تلك العملية التى تتم بدون تغير في درجة حرارة النظام . في العملية الادياباتية لا تنتقل أية حرارة إلى النظام أو منه . تنطبق المعادلة الآتية على العملية الادياباتية التى يقوم بها نظام مكون من غاز مثالى :

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

حيث $\gamma = c_p/c_v$ للغاز .

في عملية تخفيف الضغط بالخنق يسمح للمائع بأن يتمدد ادياباتيا وبسرعة خلال منفث أو قرص مسامي . تؤدي هذه العملية عادة إلى تبريد المائع أثناء التمدد .

تعرف كفاءة المحرك بالعلاقة :

$$\text{كفاءة المحرك (eff)} = \frac{\text{شغل الخرج}}{\text{طاقة الدخل}}$$

وفي حالة المحرك الحراري تتحول هذه العلاقة إلى الصورة :

$$\text{eff} = 1 - \frac{\Delta Q_{\text{ex}}}{\Delta Q_{\text{in}}}$$

حيث ΔQ_{ex} هي الطاقة المنصرفة بواسطة المحرك في دورة واحدة ، ΔQ_{in} هي الحرارة التي يزود بها المحرك في كل دورة . كفاءة محرك كارنو هي أقصى كفاءة ممكنة . يعمل محرك كارنو بين درجة حرارة المدخل العالية T_{in} ودرجة حرارة العادم المنخفضة T_{ex} . تعطى كفاءة محرك كارنو بالعلاقة :

$$\text{eff} = 1 - \frac{T_{\text{ex}}}{T_{\text{in}}}$$

لا يمكن أن تصل كفاءة المحرك إلى 100% :

في المبرد أو المضخة الحرارية تنتقل الحرارة من خزان حراري بارد إلى خزان حراري ساخن . لكي يتحقق ذلك لابد أن يزود الجهاز بالطاقة . طبقا للقانون الأول ، يجب أن تكون الحرارة المنصرفة إلى الخزان الحراري الساخن مساوية لمجموع شغل الدخل والحرارة المنتزعة من الخزان الحراري البارد .

يبين لنا القانون الثاني للديناميكا الحرارية اتجاه حدوث التغير التلقائي في النظام . يمكن صياغة القانون الثاني بثلاثة طرق متكافئة

١ - تنتقل الحرارة تلقائيا من الجسم الساخن إلى البارد وليس العكس .

٢ - إذا تغيرت حالة النظام تلقائيا من حالة إلى أخرى فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد الفوضى أو تظل ثابتة

٣ - إذا تغيرت حالة النظام المعزول فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد الانتروبيا أو تظل ثابتة .

يعطى تغير الانتروبيا ΔS لنظام ما بالطريقتين الآتيتين : إذا انتقلت كمية من الحرارة ΔQ إلى نظام عند درجة حرارة T فإن :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

وإذا كانت حالة النظام تتحقق بعدد من الطرق قدرة Ω فإن الانتروبيا تعطى في هذه الحالة بالعلاقة الآتية :

$$S = k \ln \Omega$$

حيث k ثابت بولتزمان . تقيس الانتروبيا فوضى النظام . تزداد الانتروبيا باستمرار في إلكون ككل .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

- ١ - شرح معنى متغير الحال . إعطاء أمثلة لكميات تعتبر متغيرات حالة وأمثلة أخرى لكميات لا تعتبر متغيرات حالة .
- ٢ - كتابة القانون الأول للديناميكا الحرارية .
- ٣ - حساب الشغل المبذول بواسطة نظام يتغير حجمه بمقدار معلوم ضد ضغط معلوم . استخدام الرسم البياني $P-V$ لحساب الشغل المبذول بواسطة نظام أثناء التمدد (أو الانكماش) معلوم خطه البياني .
- ٤ - تعريف التغير الايسوثرمي والتغير الأدياباتي . تطبيق القانون الأول على كل من هذين التغيرين لوصف سلوك كل من ΔU ، ΔW .
- ٥ - شرح لماذا يسخن الغاز عندما ينضغط أدياباتيا .
- ٦ - وصف مانعنيه بعملية تخفيف الضغط بالخنق وشرح لماذا يبرد المائع عادة في هذه العملية .
- ٧ - حساب الشغل المبذول بواسطة المحرك لكل دورة عندما يكون الرسم البياني $P-V$ للدورة متاحا .
- ٨ - رسم دورة النظام على الرسم البياني $P-V$ إذا كانت العمليات التي تتم في الدورة مشروحة لك بالألفاظ .
- ٩ - كتابة كفاءة محرك حراري بدلالة (أ) الشغل . أو (ب) الحرارة . كتابة كفاءة محرك كارنو بدلالة درجة الحرارة .
- ١٠ - شرح أهمية محرك كارنو ودورة كارنو .
- ١١ - وصف المبادئ الأساسية في تشغيل وحدة تبريد أو مضخة حرارية من النوع ذي الضاغط .
- ١٢ - إعطاء بعض الامثلة لأنظمة فيزيائية تتحول تلقائيا إلى حالة أكثر فوضى . شرح لماذا لا تشاهد العملية العكسية في الطبيعة إذا كان الأمر متعلقا بأعداد كبيرة من الجزيئات .
- ١٣ - استخدام العلاقة $\Delta S = \Delta Q/T$ لحساب تغير انتروپيا نظام بسيط تحت شروط ايسوثرمية .
- ١٤ - كتابة القانون الثاني للديناميكا الحرارية بثلاث طرق : (أ) سريان الحرارة : (ب) النظام والفوضى ، (ج) الانتروپيا .
- ١٥ - شرح مانعنيه بالموت الحراري للكون .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتي :

حالة النظام

متغير الحالة

القانون الأول للديناميكا الحرارية : $\Delta Q = \Delta U - \Delta W$

شغل التمدد : $\Delta W = P \Delta V$

الرسم البياني $P-V$

العملية الايسوثرمية

العملية الأدياباتية

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

عملية تخفيف الضغط بالخنق

الدورة الدينامية الحرارية ، المساحة في الرسم البياني $P-V$

$$eff = 1 - \Delta Q_{ex} / \Delta Q_{in}$$

محرك كارنو : $eff = 1 - T_{ex} / T_{in}$

المضخة الحرارية ، المبرد

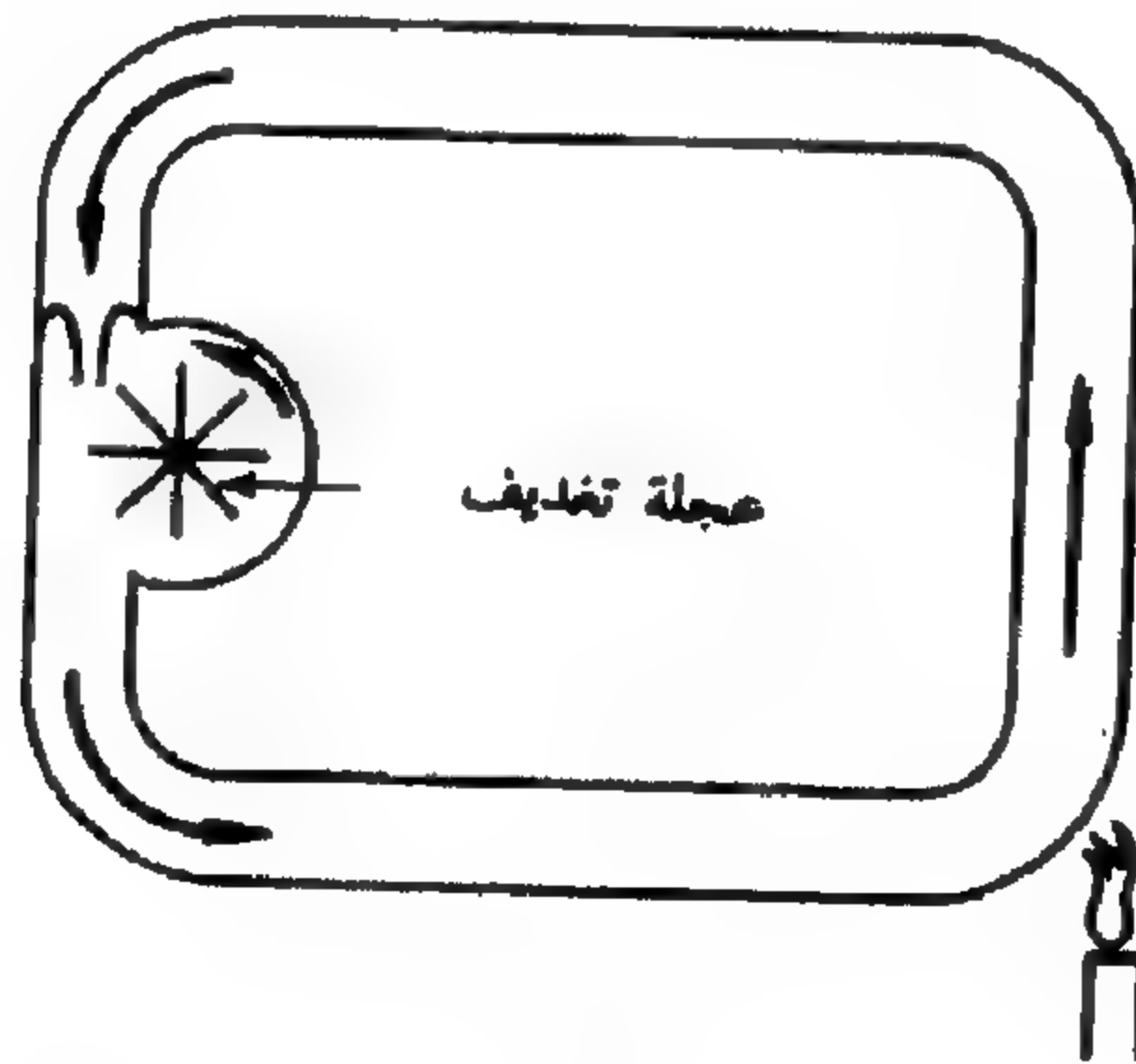
القانون الثانى للديناميكا الحرارية

$$\Delta S = \Delta Q / T; S = k \ln \Omega$$

الموت الحرارى للكون

امثلة وتلميحات

- ١ - طبق المعادلة $\Delta Q = \Delta U - \Delta W$ على كل من المواقف الآتية : (أ) صهر مكعب من الثلج بواسطة كمية من الماء الدافئ فى إبريق ترمس ، (ب) تسخين الماء فى إبريق ترمس بالرج الشديد ، (ج) شخص راقد فى الفراش فى حالة غيبوبة عميقة بدون تعاطى الدواء ، (د) بيضة مسلوقة بشدة تفسد على رف .
- ٢ - يراد ضغط كمية من غاز مثالى فى وعاء إلى نصف حجمها الأسمى . متى يكون الشغل المبذول على الغاز أكبر ، إذا تمت العملية ايسوثيرميا أم أدياباتيا ؟
- ٣ - قص على بعضهم القصة الآتية . لكشف تسرب الهواء من إطار نفخ هذا الإطار نفخا شديدا . وعندما أطلق الهواء من الصمام شعر الشخص الذى يقوم بذلك بأن اصبعه تتجمد نتيجة لتعرضه للهواء الخارج . هل تعتقد أن هذه القصة صحيحة ؟ دافع عن اجابتك .
- ٤ - الجسم البشرى مكنة معقدة بدرجة مذهلة . ناقش كلا من الآتى بالنسبة له : (أ) طاقة الدخل ، (ب) طاقة العادم ، (ج) أنواع الشغل المبذول بواسطته ، (د) الكفاءة .
- ٥ - اعتبر المحرك الحرارى البسيط المبين فى الشكل م ١٢ - ١ . يتمدد السائل المسخن الموجود فى الجانب الأيمن ويرفع إلى أعلى بواسطة السائل الأبرد الموجود فى الجانب الأيسر . ونتيجة لذلك يدور السائل فى الأنبوبة فى عكس اتجاه عقارب الساعة ، وهذا يؤدى إلى إدارة عجلة التغليف ، التى توصل عندئذ بأجهزة خارجية لبذل الشغل . اشرح ماهى العوامل التى تؤثر على كفاءة هذا المحرك . ماهو الواجب عمله لكى تصل الكفاءة إلى أعلى قيمة ؟



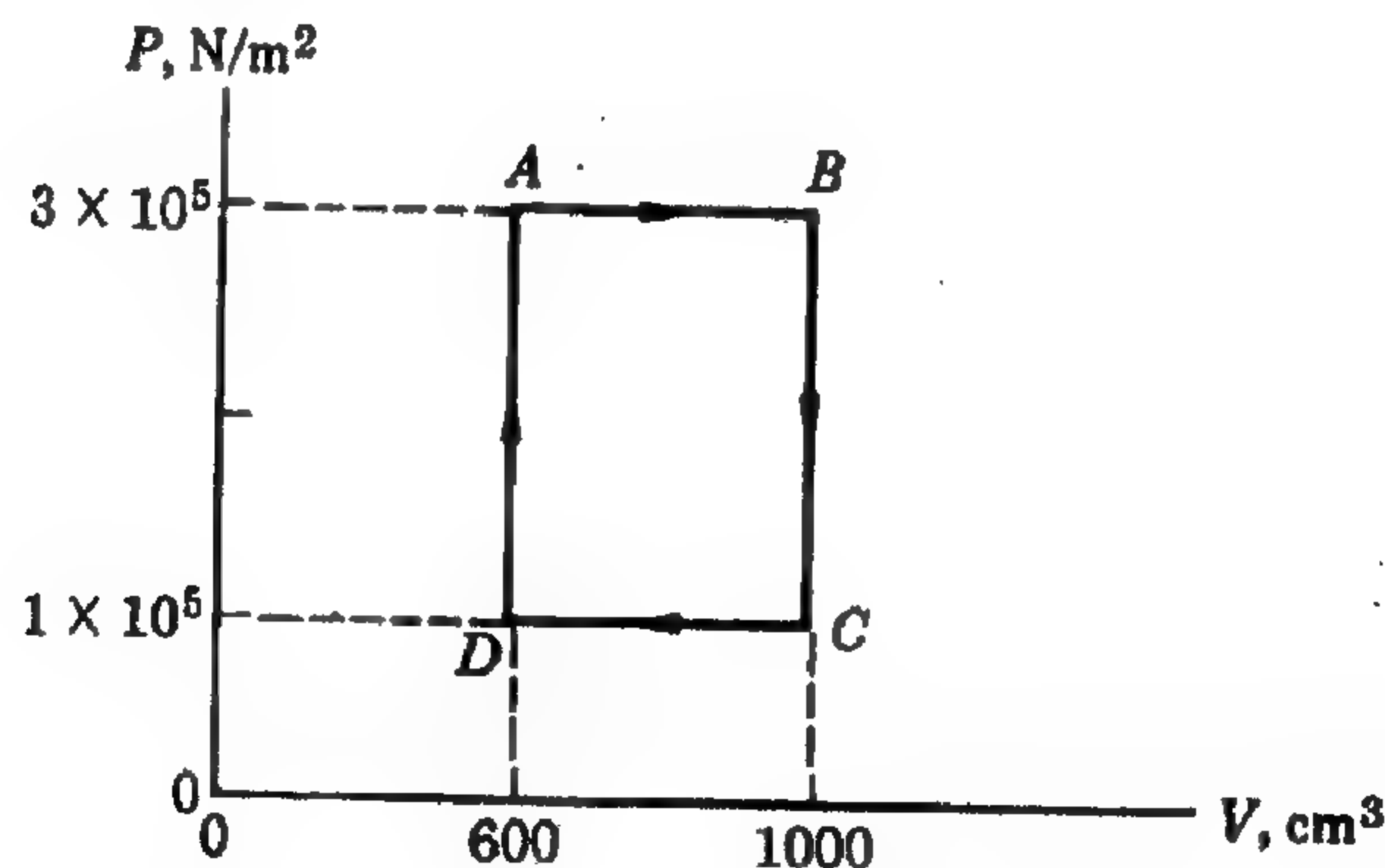
شكل م ١٢ - ١

- ٦ - درجة حرارة الجسم هى 98.6°F . وبالرغم من ذلك فإن الحرارة تنتقل من الجسم إلى الوسط الخارجى حتى إذا كانت درجة حرارته اهل من ذلك . ألا يتعارض ذلك مع حقيقة أن الحرارة تنتقل فقط من الجسم الساخن إلى البارد ؟ بالمثل ، يمكن تبريد البطيخة بلفها فى قماش مبلل حتى فى اليوم (شديد الحرارة) . كيف تستطيع أن توفق بين هذا وبين القانون الثانى ؟
- ٧ - يتبع الطفل تركيبا عالى النظام عند نموه . وكل جزء هو وحدة مركبة بعناية وترتب الجزيئات فى الجسم بطريقة عالية النظام . ألا يتعارض هذا النمو وما يصاحبه من درجة عالية فى النظام مع القانون الثانى ؟ وأخيرا ، ماهو مصدر طاقة الطفل ؟ كرر هذا السؤال فى حالة نمو النبات .

- ٨ - إذا أُلقيت قطعة عمل على منضدة عددا كبيرا من المرات ، فما هو العدد النسبي من المرات الذي يجب أن تظهر فيه الصورة على الوجه العلوي لكليهما ؟ أجر التجربة بنفسك لترى ما إذا كانت اجابتك صحيحة .
- ٩ - لكل نرد ستة أوجه تحمل نقاطا عددها من 1 إلى 6 ، القى زوج من النرد على المنضدة . ماهي النسبة بين احتمال أن يكون مجموعة الوجهين العلويين 2 واحتمال أن يكون مجموعهما 3 ماهي هذه النسبة إذا كانت المجموعة في الحالة الثانية 4 بدلا من 3 ؟
- ١٠ - اراد صبي تبريد جو مطبخ المنزل ففتح باب المبرد وتركه مفتوحا . هل لهذا أثر فعال ؟ أجب عن السؤال آخذا في الاعتبار المدى القريب والمدى البعيد . هل يختلف الموقف إذا استخدمت الثلاجة القديمة (صندوق الثلج) بدلا من المبرد ؟
- ١١ - وضعت أسطوانتان يغلقي كل منهما كباس قابل للحركة جنبا إلى جنب . وكانت الأسطوانتان متماثلتين في جميع الوجوه عدا أن احدهما كانت تحتوي على الأكسجين (O_2) ، بينما كانت الأخرى تحتوي على الهليوم (He) . ضغطت الآن الأسطوانتان ادياباتيا إلى خمس حجمها الأصلي . أي الغازين ترتفع درجة حرارته أكثر من الآخر ؟

مسائل

- ١ - (أ) ماهو مقدار التغير في الطاقة الداخلية عندما يتحول 15 g من الثلج في درجة $0^\circ C$ إلى ماء في درجة $0^\circ C$ ؟ أهمل حقيقة أن الثلج أقل كثافة من الماء . (ب) إذا كان من الضروري أن تأخذ تأثير الإنكماش في الاعتبار ، هل ستكون اجابتك أصغر أو أكبر ؟
- ٢ - ضغط غاز مثالي في أسطوانة يبطء إلى ثلث حجمه الأصلي . وأثناء هذه العملية ظلت درجة الحرارة ثابتة وكان الشغل المبذول في الانضغاط هو 45 J (أ) ماهو مقدار التغير في الطاقة الداخلية في هذه العملية ؟ (ب) ماهي كمية الحرارة التي انتقلت إلى الغاز ؟
- ٣ - ضغط غاز مثالي في أسطوانة ادياباتيا إلى ثلث حجمه الأصلي . وكان الشغل المبذول على الغاز أثناء هذه العملية 45 J . (أ) ماهو مقدار التغير في الطاقة الداخلية في هذه العملية ؟ (ب) ماهي كمية الحرارة التي انتقلت إلى الغاز ؟
- ٤ - مر غاز بالعملية الدورية المبينة في الشكل م ١٢ - ٢ . (أ) أوجد الشغل المبذول بواسطة الغاز في الأجزاء AB ، BC ، CD ، DE من الدورة ؟
- ٥ - يمثل الشكل م ١٢ - ٢ دورة دينامية حرارية لغاز مثالي . وكانت درجة حرارة الغاز عند النقطة D هي $20^\circ C$ (أ) أوجد درجة الحرارة عند النقط A ، B ، C . (ب) عند إجراء الدورة هل أضيفت الحرارة في الجزء AB ؟ BC ؟ CD ؟ DA ؟



شكل م ١٢ - ٢

- *٦ - في حالة الهواء $c_v = 0.177 \text{ cal/(g)}^\circ C$. اعتبر كمية من الهواء في أسطوانة مغلقة بكباس قابل للحركة تحت ضغط ثابت قدره 3.0 atm . ماهي كمية الحرارة التي يجب إضافتها إلى الغاز لكي تتغير درجة حرارته من $27^\circ C$ إلى $300^\circ C$ ؟ كتلة الهواء في الأسطوانة 20 g وحجمه الابتدائي 5860 cm^3 . تلميح : لاحظ أن $mc_v \Delta T$ هي الطاقة الحرارية اللازمة لتغيير درجة حرارة الهواء بمقدار ΔT .

- *٧ - أسطوانة سعتها 16.000 cm^3 مغلقة من أحد طرفيها بكباس وتحتوى على 20 g من الهواء في درجة 30°C . دفع الكباس فجأة إلى الداخل بحيث تغير حجم الغاز إلى 1600 cm^3 . وحيث أن الانضغاط أدياباتي ، فإن درجة حرارة الغاز ارتفعت إلى القيمة النهائية 500°C . ماهى كمية الشغل المبذول في ضغط الغاز ؟ في حالة الهواء $c_v = 0.177 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}$.
- *٨ - تحتوى أسطوانة يفلقها كباس على 30 g من الهواء المضغوط ضغطا شديدا . وكان حجم الهواء 2400 cm^3 وضغطه $10 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ودرجة حرارته 35°C تمدد الغاز الآن أدياباتيا حتى وصل حجمه إلى 24000 cm^3 ، وأثناء هذه العملية بذل الغاز شغلا قدره 4100 J . ماهى درجة الحرارة النهائية للغاز ؟ افترض أن $c_v = 0.177 \text{ cal/(g)(}^\circ\text{C)}$.
- *٩ - انكمشت كمية من غاز الهليوم درجة حرارتها 20°C وضغطها 1 atm أدياباتيا إلى ربع حجمها الأصلي . (أ) ماهو ضغطها النهائي ؟ (ب) ماهى درجة حرارتها النهائية ؟
- *١٠ - عند احتراق الجازولين يعطى كمية من الطاقة قدرها 11000 cal/g ، وتسمى هذه الكمية من الحرارة بحرارة الإحتراق . فإذا كانت سيارة تستهلك 9.5 kg من الجازولين في الساعة بكفاءة قدرها 25% . فما هى القدرة بالحصان ؟
- ١١ - تتسارع سيارة كتلتها 1500 kg من السكون إلى سرعة قدرها 8.0 m/s في زمن قدره 7.0 s . (أ) ماهى أقل قدرة بالحصان لمحرك السيارة إذا كانت جميع فواقد الاحتكاك مهملة ؟ (ب) باستخدام هذه القيمة وبفرض أن السيارة تستهلك وقودها بكفاءة قدرها 20% ، فما هى كمية الجازولين التى تحرقها السيارة في خلال الزمن 7.0 s . ملحوظة : كمية الحرارة الناتجة من احتراق جرام واحد من الجازولين ، أى حرارة احتراق الجازولين ، حوالى 11000 cal/g .
- ١٢ - طاقة الخرج لوحدة نووية متوسطة الحجم لتوليد القدرة تساوى حوالى $7 \times 10^8 \text{ W}$. بفرض أن الكفاءة الإجمالية للوحدة 20% ، (أ) ماهى الطاقة التى تستهلكها الوحدة في النهاية ؟ (ب) ماهى كمية الحرارة المنصرفة إلى نظام التبريد في الثانية ؟ (ج) كرر (أ) ، (ب) بالنسبة لوحدة تعمل بالوقود الاحفورى لما نفس طاقة الخرج والكفاءة .
- ١٣ - في المحركات التربينية البخارية ذات الضغط العالى يسخن البخار إلى حوالى 600°C ويصرف عند درجة حرارة قريبة من 90°C . ماهى أقصى كفاءة ممكنة لأى محرك يعمل بين هاتين الدرجتين ؟
- ١٤ - أعطيت ثلاث قطع عمله مميزة كل منها بعلامة بحيث يمكن تتبعها . ماهو عدد الطرق المختلفة التى يمكن أن ترتب بها القطع أنفسها (صورة أو كتابة) عند إلحاقها . ماهو احتمال أن تظهر الصورة على الوجه العلوى لجميع القطع ؟
- ١٥ - إلقى زوج من النرد على المنضدة . (أ) أى الإحتمالين أكبر : أن يكون مجموع الوجهين العلويين 3 أو 5 ؟ (ب) ماهو عدد الطرق الممكنة لأن يكون المجموع 3 ؟ (ج) ماهو عدد الطرق الممكنة لأن يكون المجموع 5 ؟ (د) ماهو المجموع ذو الاحتمال الأكبر ؟
- ١٦ - عند القاء عدد N من قطع العملة المميزة بعلامات يكون عدد التوافقيات الممكنة من الصورة والكتابة هو 2^N . ماهو عدد التوافقيات الممكنة إذا استخدمت (أ) 3 قطع (ب) 5 قطع ، (ج) 50 قطعة ؟ تلميح : إذا لم يكن لديك حاسب الكترونى أو كنت لاتعرف طريقة استخدام اللوغاريتمات يمكن أن تلجأ إلى الطريقة المبينة على فكرة أن $a^{50} = a^9 \cdot a^9 \cdot a^9 \cdot a^9 \cdot a^9$.
- ١٧ - باستخدام الشرح المعطى في المسألة ١٦ ، (أ) ماهو الاحتمال لأن تتجمع 10 نملات تتحرك بحركة عشوائية في أحد نصفي صندوق ؟ كرر ذلك في حالة تجمع جميع النملات في أحد نصفي الصندوق عدا واحدة فقط .
- ١٨ - ماهو تغير الانتروبيا بالتقريب الذى يحدث عند تبريد 15 g من 20°C إلى 18°C ؟ (افترض أن T ثابتة تقريبا) .
- *١٩ - خمس قطع عمله يمكن القاؤها لتظهر الصورة أو الكتابة على الوجه العلوى لكل منها . (أ) ماهى الانتروبيا في حالة ظهور الصورة على جميع الأوجه العلوية ؟ (ب) ماهى الانتروبيا في حالة ظهور الصورة على الأوجه العلوية لها جميعا عدا واحدة ؟

الفصل الثالث عشر

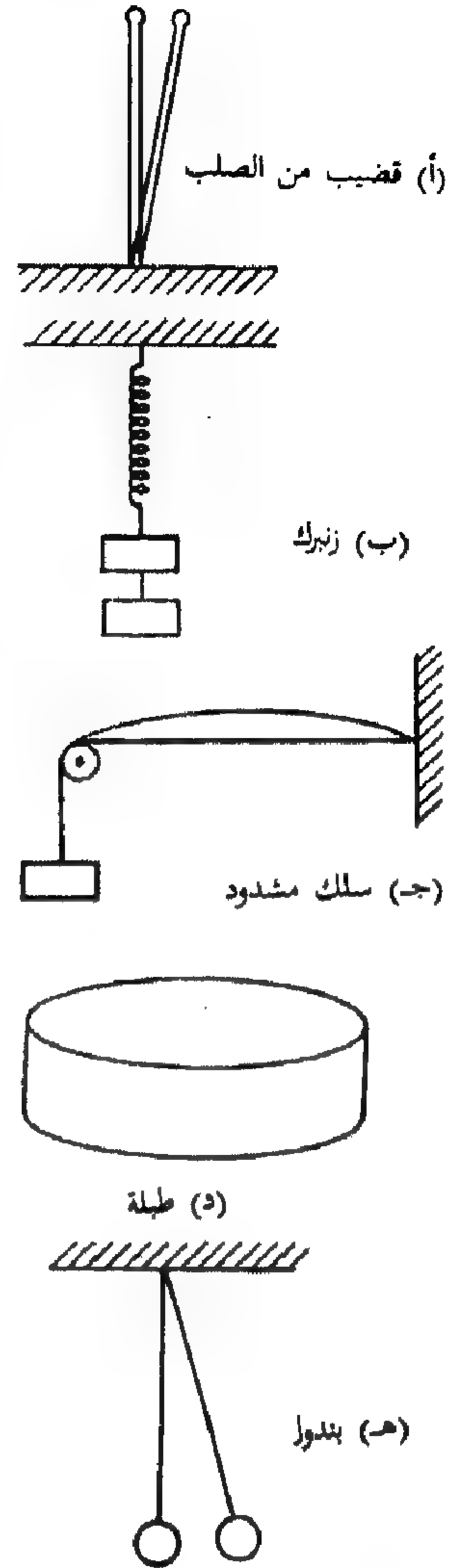
الحركة الاهتزازية

في هذا الفصل سنعود إلى دراسة ميكانيكا الحركة استعداداً لدراسة الموجات ، مثل الموجات على وتر كمان ، والموجات الصوتية في الهواء والموجات الكهرومغناطيسية التي تسير في الفراغ . وعندما تتقدم في دراستك لعلم الفيزياء ستجد أن حركة الموجات على نفس الدرجة من الأهمية - على الأقل - كحركة الأجسام المادية . من المهم أذن أن نفهم سلوك الموجات . وسوف نبدأ هذه الدراسة بمناقشة حركة الأجسام المادية التي تولد الموجات . وسوف يخصص الفصل التالي لدراسة بعض أنواع الموجات التي تولدها الحركات الاهتزازية التي ستناقش في هذا الفصل .

١٣ - ١ الأنظمة المهتزة

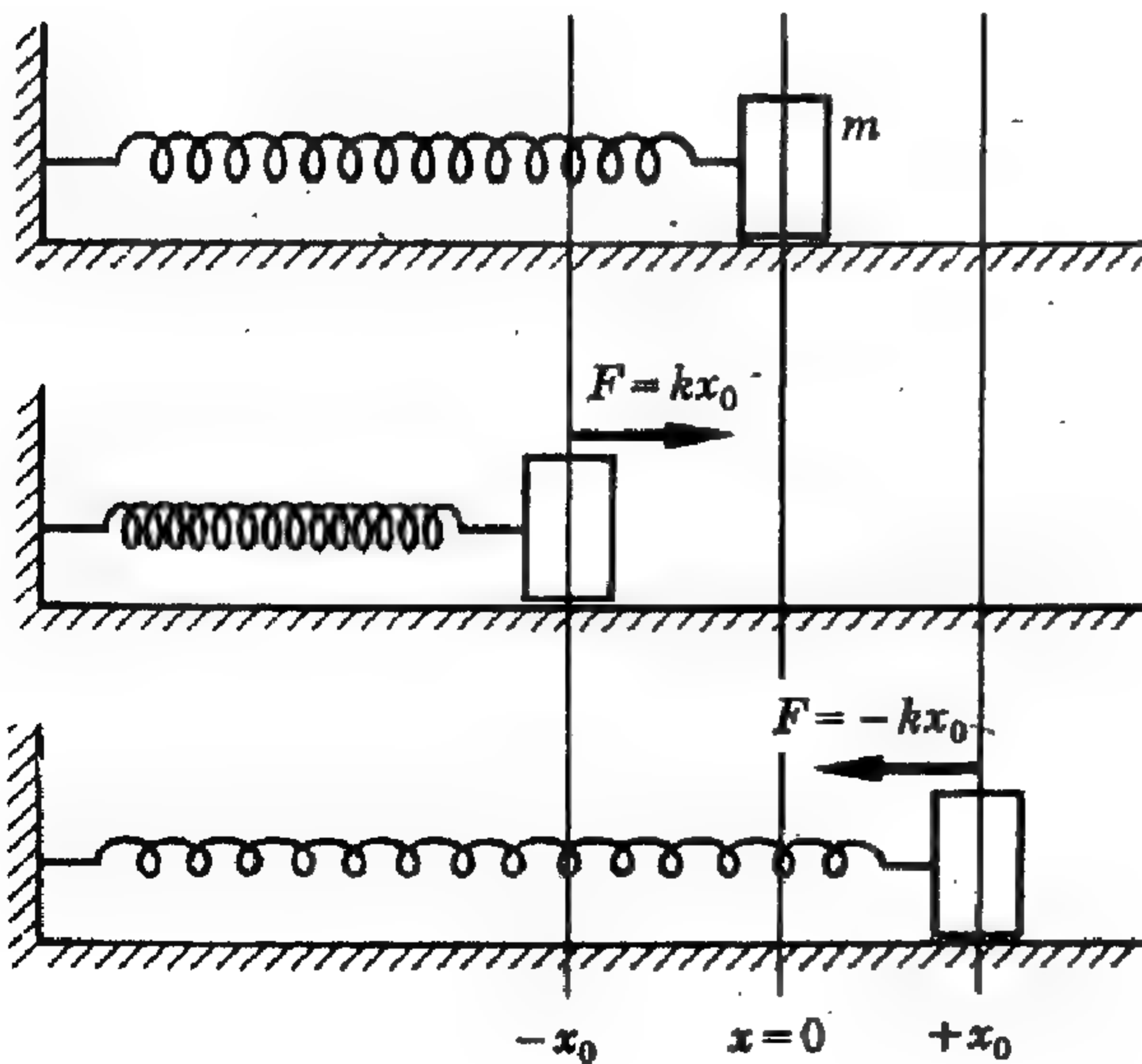
من الممكن أن نحرك أى جسم أو نظام من حركة اهتزازية ، ويمثل الشكل ١٣ - ١ بعض الأمثلة العامة لأجسام وأنظمة توضح هذا النوع من الحركة . وتعتبر الأمثلة الثلاثة الأولى حالات بسيطة إلى حد ما . فإذا ازيح النظام عن الموضع المبين ثم ترك حراً فإن قوة الاستعادة المرنة سوف تسبب اهتزاز للنظام .

وفي المثال الرابع في الشكل ١٣ - ١ ، وهو عشاء الطبلية ، يهتز النظام اهتزازاً معقداً عندما يعانى تشوها مرناً بالطرق . وبالرغم من أن قوة الاستعادة المرنة غير موجودة في النظام الخامس ، وهو البندول ، فإننا نعلم جيداً أن هذا النظام سوف يهتز إذا ازيح عن موضع التوازن . هناك إذن خاصية مشتركة لجميع هذه الأنظمة ، وكذلك جميع الأجسام المهتزة الأخرى . فإذا ازيح أى من هذه الأنظمة عن موضع توازنه ، فإن ذلك سيؤدى إلى ظهور قوة استعادة تحاول إعادة النظام إلى موضع توازنه .



١٣ - ٢ الزنبرك المهتز

يعتبر الزنبرك المتصل بكتلة مثبتة في أحد طرفيه واحداً من أبسط الأنظمة المهتزة . وسوف نرى أن حركة هذا الجهاز مثال نموذجي لجميع الحركات الاهتزازية البسيطة . ولكن نتحاشى جميع التعقيدات الممكنة سنفترض أن الكتلة مستقرة على سطح لا احتكاكي ، كما هو مبين في الشكل ١٣ - ٢ .



شكل (١٣ - ١)

بعض الأنظمة المهتزة النموذجية .

شكل (١٣ - ٢)

(أ) الكتلة m في حالة التوازن ، (ب) عندما ينضغط الزنبرك تخزن طاقة الوضع فيه . وعندما يترك النظام حراً تتحول طاقة الوضع إلى طاقة حركة تتحول بدورها في النهاية إلى طاقة وضع مرة أخرى عندما تصل الكتلة إلى الموضع المبين في (ج) . لاحظ أن الزنبرك هو الذى يعطى القوة kx .

يمثل الجزء أ من الشكل النظام في وضع التوازن . في هذه الحالة لن توجد أية قوة أفقية مؤثرة على الكتلة في ذلك الموضع (كذلك فإن شد الجاذبية إلى أسفل يتزن مع دفع المنضدة إلى أعلى ، وعليه فإن محصلة القوى الرأسية المؤثرة على الكتلة تساوى صفرا دائما) .

لنفرض أننا ضغطنا الزنبرك الآن بتحريك الكتلة إلى الموضع المبين في الجزء ب . عندئذ نكون قد بذلنا شغلا على الزنبرك أثناء عملية الانضغاط ، وهذا الشغل يخترن في الزنبرك على هيئة طاقة وضع . ونتيجة لذلك يؤثر الزنبرك المنضغط على الكتلة بقوة تحاول أن تدفعها إلى الخلف إلى الموضع $x = 0$. والآن إذا سمحنا للكتلة بأن تتحرك بحرية ، فإن الزنبرك سوف يسبب تسارعها إلى اليمين باستمرار حتى تصل إلى الموضع $x = 0$. وعند وصول الكتلة إلى هذا الموضع تكون قد اكتسبت سرعة كبيرة ، ويكون الزنبرك قد فقد كل طاقة الوضع المختزنة فيه نتيجة للانضغاط ، ومن الواضح أن طاقة الوضع المختزنة في الزنبرك قد انتقلت إلى الكتلة وظهرت كطاقة حركة للكتلة المتحركة .

ومن الطبيعي أن الكتلة لن تتوقف عند وصولها إلى النقطة $x = 0$ ، لأن طاقة حركتها يجب أن تفقد في بذل الشغل قبل أن تصل إلى السكون . وعندما تبدأ الكتلة في الحركة في الجانب الأيمن من الموضع $x = 0$ فإن الزنبرك يبدأ في التمدد في نفس الوقت ، ويؤدي هذا بالطبع إلى اختزان الطاقة فيه . وعندما تصل الكتلة إلى الموضع المبين في الجزء جـ من الشكل ١٣ - ٢ تكون قد فقدت كل طاقة وضعها في بذل الشغل ضد الزنبرك ، وهذا يعني أن طاقة حركة الكتلة قد تحولت بأكملها إلى طاقة وضع في الزنبرك الممتد .

وفي هذه اللحظة يبدأ الزنبرك في تحريك الكتلة إلى اليسار ، وعند وصولها إلى الموضع $x = 0$ تكون الطاقة قد تحولت بأكملها إلى طاقة حركة مرة أخرى . لذلك فإن الكتلة ستقوم بضغط الزنبرك إلى الموضع $x = -x_0$ ، حيث تتحول طاقة الحركة بأكملها إلى طاقة وضع مختزنة في الزنبرك المنضغط . وعندئذ سوف تتكرر العملية مرة أخرى ، وإذا لم تكن هناك أية فواقد احتكاكية للطاقة فإن الكتلة سوف تهتز ذهابا وأيابا بين الموضعين $x = +x_0$ و $x = -x_0$ إلى الأبد وهذا مثال نموذجي للأنظمة المهتزة . لاحظ أن الكتلة تتذبذب ذهابا وأيابا ، وأن الطاقة تتذبذب ذهابا وأيابا بين طاقة الحركة وطاقة الوضع ، ولكن الطاقة الكلية يجب أن تظل ثابتة . لماذا ؟

تستخدم بعض المصطلحات لوصف هذه الحركة الاهتزازية :

١ - سعة الاهتزاز هي المسافة x_0 في الشكل ١٣ - ٢ ، أى أنها أقصى إزاحة للكتلة من موضع توازنها .

٢ - زمن الاهتزاز τ هو الزمن اللازم لعمل ذبذبة كاملة ، أى أنه الزمن الكلى اللازم لكي تتحرك الكتلة من نقطة البداية $-x_0$ إلى $+x_0$ ثم تعود إلى $-x_0$ مرة ثانية . (τ هو الحرف اليونانى تاو)

٣ - تردد الاهتزاز f هو عدد الذبذبات الكاملة التى تعملها الكتلة فى وحدة الزمن . فمثلا ، إذا كان زمن الاهتزاز 0.10 s ، فإن التردد يكون $10\text{ cycles per seconds (cps)}$ (أى عشر دورات فى الثانية) أى $1/\tau$. تسمى الوحدة cps فى احيان كثيرة بالهرتز Hz نسبة إلى هاينريش هرتز وهو أول من أثبت وجود موجات الراديو . ويستخدم المصطلحان cps و Hz سويا فى هذا الكتاب . (يستخدم الحرف اليونانى ν - نيو - عادة بدلا من f للدلالة على التردد) . ومن المفيد دائما أن تتذكر أن التردد f يرتبط بزمن الاهتزاز τ بالعلاقة :

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (١٣ - ١)$$

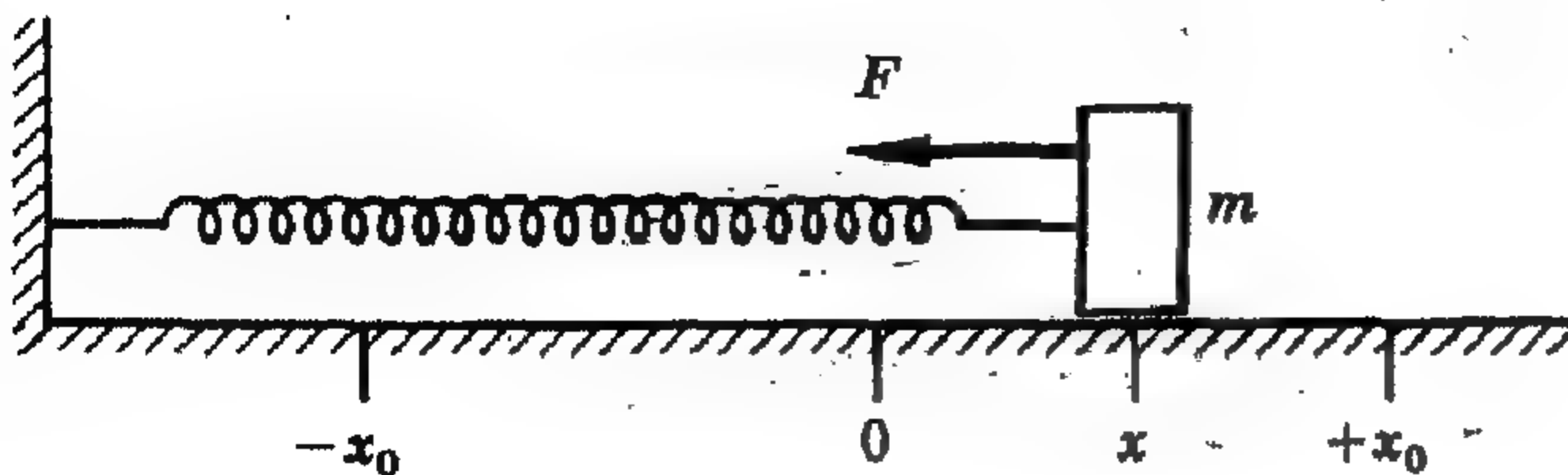
٤ - الإزاحة x هي المسافة بين الكتلة وموضع التوازن فى أية لحظة أثناء الاهتزاز .

١٣ - ٣ الحركة التوافقية البسيطة

لكى يمكننا مناقشة الزنبرك المهتز بطريقة كمية يجب أن نعلم كيفية تغير القوة المؤثرة على الكتلة . ومن المفيد فى هذا الخصوص أن نعلم أنه إذا لم يكن الزنبرك ممتدا أو منضغطا بدرجة كبيرة ، فإنه يتبع قانون هوك الذى ناقشناه فى الفصل التاسع . ولعلك تذكر أن تشوه النظام الذى يتبع قانون هوك يسبب ظهور قوة استعادة يتناسب مع مقدار التشوه . وبالنسبة للحالة المبينة فى الشكل ١٣ - ٣ ، يعنى ذلك أن القوة F التى يجذب لها الزنبرك الكتلة المثبتة فيه تعطى بالعلاقة :

$$F = -kx \quad (١٣ - ٢)$$

وتبين الإشارة السالبة أن القوة متجهة فى ذلك الاتجاه الذى يؤدي إلى نقص التشوه . فعندما تكون x موجبة ، تكون القوة المؤثرة على الكتلة متجهة فى الاتجاه السالب محاولة أن تعيد الكتلة إلى موضع اتزانها . ماهر اتجاه القوة المؤثرة على m إذا كانت x سالبة ؟



شكل (١٣ - ٣)

تسبب القوة المعطاه بقانون هوك والى تؤثر على الكتلة اهتزازها فى حركة توافقية بسيطة .

تتحرك جميع الأنظمة التي تتبع قانون هوك والتي يكون الاحتكاك فيها صغيرا نفس الحركة الاهتزازية السابق وضعها ، وهي تسمى الحركة التوافقية البسيطة (SHM). وسوف نستخدم هذه الحقيقة فيما بعد عند تعميم حركة النظام « زنبرك - كتلة » على أنظمة أخرى . ويسمى الثابت k في المعادلة (١٣ - ٢) في جميع هذه الحالات ثابت الزنبرك . وحيث أن هذا الثابت يساوي F/x عدديا يمكننا إذن اعتباره مقياسا للقوة اللازمة لتشويه النظام بمقدار وحدة المسافة ، ومن الواضح أن k يجب أن يكون كبيرا للزنبرك الكرز ، بينما يجب أن يكون k صغيرا للنظام سهل التشويه .

اعتبر ما يحدث عندما يمتد الزنبرك من $x=0$ حيث $F=0$ إلى $x=x_0$ حيث $F=-kx_0$. في هذه العملية يبذل الشغل ضد الزنبرك ، ويمكن حساب هذا الشغل بضرب متوسط القوة في المسافة التي تحركها الزنبرك . ومن الواضح أن متوسط القوة يساوي نصف القوة القصوى وأن المسافة هي x_0 ومن ثم فإن الطاقة المخزنة في الزنبرك عندما يمتد الزنبرك إلى أقصى نقطة هي :

الطاقة

المخزنة

في زنبرك

$$PE = \left(\frac{1}{2}kx_0\right)(x_0) = \frac{1}{2}kx_0^2$$

وتبين لنا هذه الحقائق أن الطاقة المخزنة في زنبرك ممتد أو منضغط بمقدار x تساوي $\frac{1}{2}kx^2$ فإذا علمنا ذلك ، يمكننا حساب سرعة الكتلة في أى موضع بين $-x_0$ و $+x_0$. وهذا لأن الطاقة الكلية للنظام ، أى مجموع طاقتي الحركة والوضع ، يجب أن يكون ثابتا ومساويا لطاقة الوضع العظمى ، وهي $\frac{1}{2}kx_0^2$ بالتحديد . إذن :

$$(١٣ - ٣) \quad PE + KE = \frac{1}{2}kx_0^2 = \text{طاقة الوضع القصوى}$$

وبالتعويض عن طاقة الوضع PE بالمقدار $\frac{1}{2}kx_0^2$ وعن طاقة الحركة KE بالمقدار $\frac{1}{2}mv^2$ نجد أن :

$$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_0^2$$

حيث m هي الكتلة المثبتة في طرف الزنبرك ، v سرعتها . وتبسيط العلاقة السابقة نحصل على :

$$(١٣ - ٤) \quad mv^2 = k(x_0^2 - x^2)$$

وعليه ، فإذا كانت سعة الاهتزاز x_0 وثابت الزنبرك معلومين يمكننا حساب سرعة الكتلة في أى موضع ولأية إزاحة باستخدام المعادلة (١٤ - ٣) .

وبالطبع تتغير سرعة حركة الكتلة باستمرار ، وتكون السرعة أكبر ما يمكن عند $x=0$ عندما تكون الطاقة الكلية في صورة طاقة حركة . لندرس الآن كيفية تغير تسارع الكتلة أثناء الحركة ، ويمكننا تحقيق ذلك بسهولة . ذلك أننا نعلم أن القوة غير المتزنة المؤثرة على الكتلة هي الشد في الزنبرك ، وهذه القوة تساوى $-kx$ طبقا للمعادلة (١٣ - ٢) . وباستخدام قانون نيوتن $F = ma$ نجد أن :

$$-kx = ma$$

ومنه نجد أن تسارع الكتلة يعطى بالعلاقة :

$$a = -\frac{k}{m}x \quad (١٣ - ٥)$$

وبلاحظ أن المعادلتين (١٣ - ٤) و (١٣ - ٥) تنطبقان على جميع الأجسام التي تتحرك حركة توافقية بسيطة (SHM) .

مثال توضيحي ١٣ - ١ : يمتد زنبرك معين بمقدار 20 cm عندما تعلق فيه كتلة قدرها 500 g . لنفرض أننا ثبتنا كتلة قدرها 2.0 kg في أحد طرفي هذا الزنبرك ثم أزحناها مسافة قدرها 40 cm من موضع التوازن ثم تركناها . أوجد (أ) أقصى سرعة لهذه الكتلة ، (ب) أقصى تسارع لها ، (ج) السرعة والتسارع عند $x = 10$ cm .

طريقة الحل . يجب أولا إيجاد ثابت الزنبرك k . وحيث أن الكتلة 0.50 kg تكافئ وزنا (أى قوة) تساوى 4.90 N ، إذن $k = F/x = 24.5$ N/m

أ - تتحرك الكتلة بأقصى سرعة عندما تكون في الموضع المركزي ، أى عند $x=0$. وحيث أن طاقة الوضع القصوى تساوى $\frac{1}{2}kx_0^2$ أى :

$$\frac{1}{2}(24.5 \text{ N/m})(0.16 \text{ m}^2) = 1.96 \text{ J}$$

وحيث أن هذه الطاقة بأكملها توجد على هيئة طاقة حركة عند النقطة $x=0$ إذن

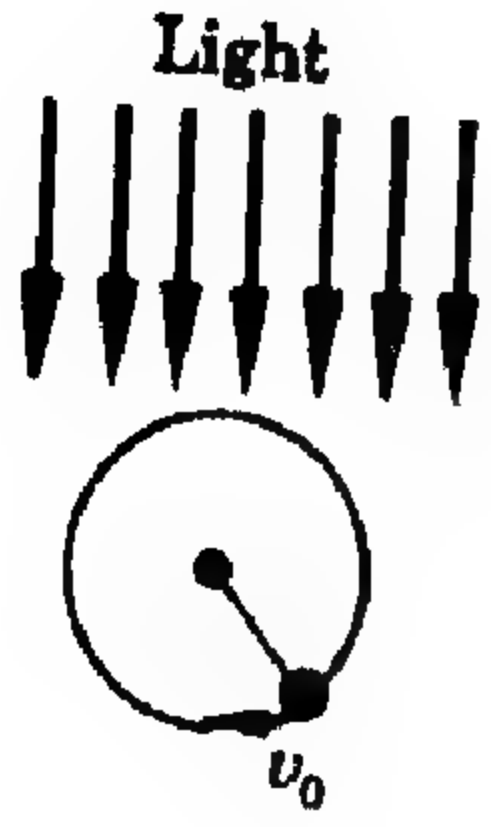
$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = 1.96 \text{ J}$$

وبوضع $m = 2.0$ kg نجد أن :

$$v_{\max} = 1.40 \text{ m/s}$$

ب - يكون التسارع في نهايته القصوى عندما تكون القوة kx أكبر ما يمكن أى : عندما تكون $x = x_0$ ، وفي هذه الحالة :

$$a_{\max} = \frac{F_{\max}}{m} = \frac{(24.5 \text{ N/m})(0.40 \text{ m})}{2 \text{ kg}} = 4.9 \text{ m/s}^2$$



ج - عند النقطة $x = 0.10 \text{ m}$ نجد أن العجلة تساوي :

$$a = \frac{F}{m} = \frac{(24.5 \text{ N/m})(0.10 \text{ m})}{2 \text{ kg}} = 1.22 \text{ m/s}^2$$

وأيضاً ، حيث أن :

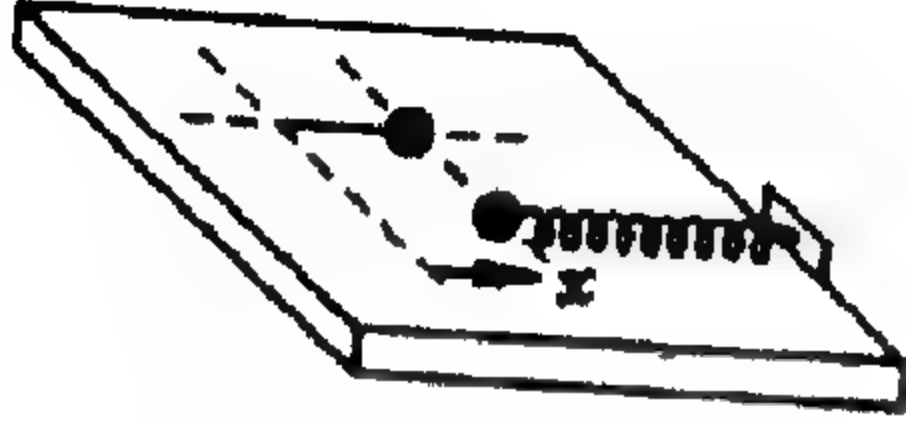
$$\frac{1}{2}kx_0^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$$

نجد أن :

$$1.96 \text{ J} = \frac{1}{2}(2 \text{ kg})(v^2) + \frac{1}{2}(24.5 \text{ N/m})(0.10)^2$$

ومنه :

$$v = 1.36 \text{ m/s}$$



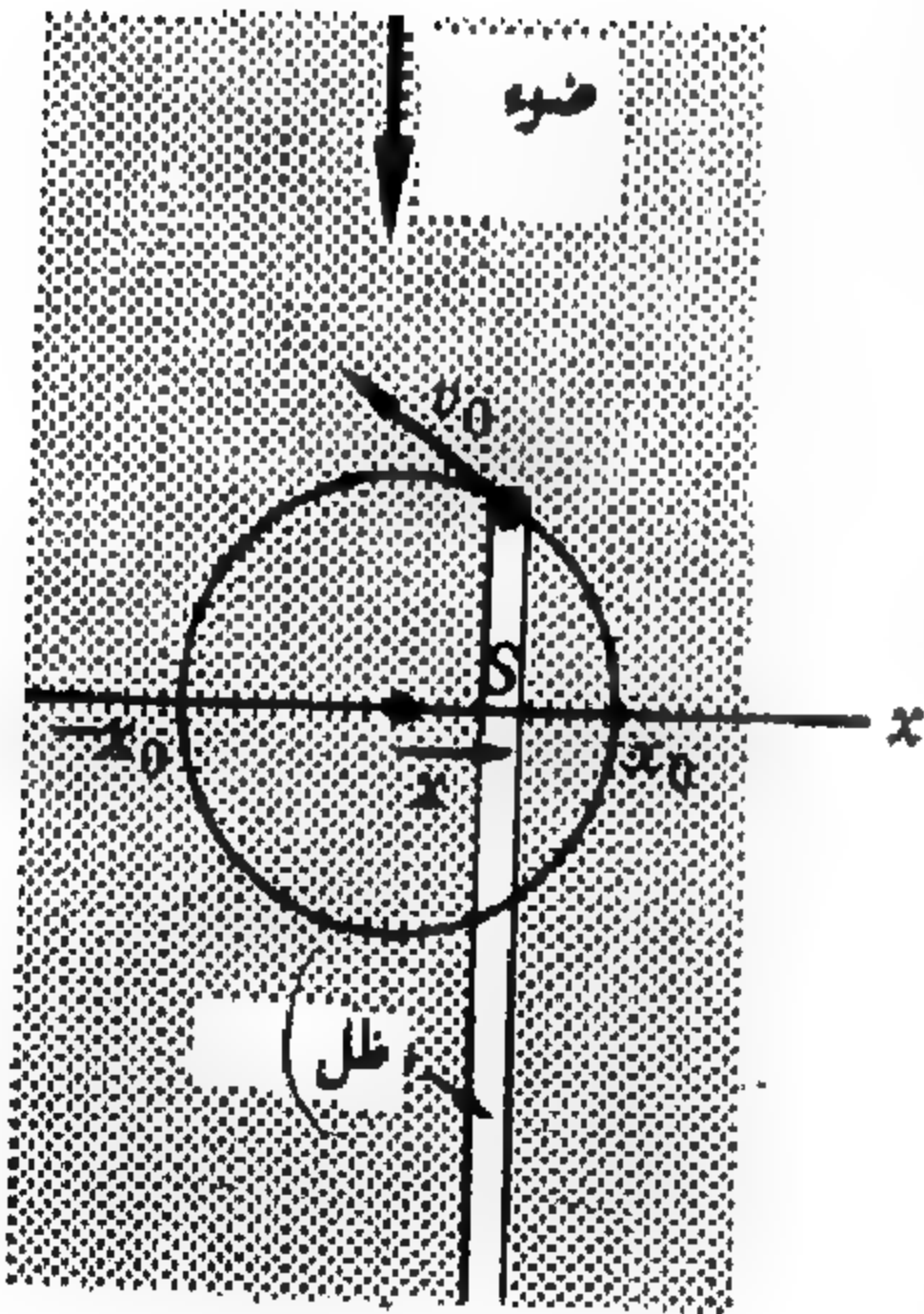
١٣ - ٤ زمن الاهتزاز

لقد حسبنا حتى الآن كل الكميات المتعلقة بالحركة التوافقية البسيطة تقريباً ، وقد وضعنا في الجزء الأخير كيف يمكننا إيجاد سرعة وتسارع الجسم المهتز . وما يتبقى الآن هو أن تعرف طريقة إيجاد تردد الاهتزاز .

هناك عدة طرق لإيجاد تردد الذبذبات f . وتعتمد إحدى أبسط هذه الطرق على التشابه بين كرة تتحرك في مسار دائري ، وكتلة تهتز في نهاية زنبرك وهذا موضح في الشكل ١٣ - ٤ . فعندما تتحرك الكرة على محيط الدائرة بسرعة لا اتجاهية ثابتة v_0 فإن ظلها على مستوى يقع أسفلها يتحرك ذهاباً وإياباً ، وقد أثبت في النهاية أن الظل يتحرك حركة توافقية بسيطة . وفي الحقيقة إذا اختيرت السرعة v_0 بطريقة صحيحة يمكن أن يتحرك الظل في اتساق مع الكتلة المهتزة في نهاية الزنبرك الموضح في الشكل .

سنحاول الآن إثبات ذلك ثم استخدام النتائج التي نحصل عليها في إيجاد تردد الحركة التوافقية البسيطة .

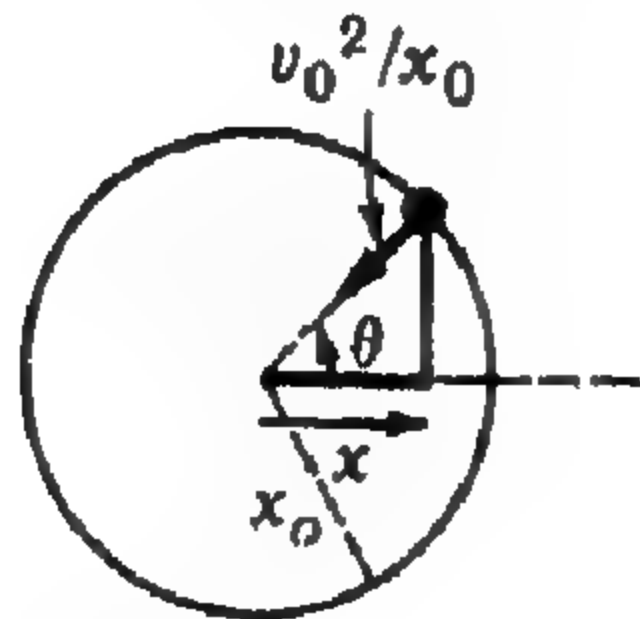
من الواضح أن الكتلة المهتزة في نهاية زنبرك لا تتحرك بتسارع ثابت ، إذ تبين لنا المعادلة (١٣ - ٥) أن $a \sim x$ ، وعليه فإن التسارع يتغير باستمرار . ولهذا السبب فإن الحركة التوافقية البسيطة ليست بسيطة بالرغم من اسمها . ولكن استخدام التشابه بين الحركة الدائرية والحركة التوافقية البسيطة يمكن أن يساعدنا في الحصول على نتائج هامة . ولتحقيق ذلك ارجع إلى الشكل ١٣ - ٥ .



(أ)

شكل (١٣ - ٥)

تتحرك الكرة على الدائرة بسرعة لا اتجاهية ثابتة v_0 . والازاحة x لظل هذه الكرة تتحرك حركة توافقية بسيطة سعياً x_0 للظل $v_0 = x_0 \sqrt{k/m}$.



(ب)

علمنا أن الكرة المتحركة في مسار دائري بسرعة لا اتجاهية ثابتة v_0 تقع تحت تأثير تسارع الجذب المركزي ومقداره v_0^2/r وهذا التسارع مبين في الجزء ب من الشكل . ولكن نصف قطر الدائرة في حالتنا هذه هو x_0 ، إذن يعطى تسارع الجذب المركزي في هذه الحالة بالمقدار v_0^2/x_0 . وعندما تتحرك الكرة على محيط الدائرة ، يتذبذب ظلها ذهابا وإيابا على المحور x كما هو مبين في الجزء (أ) . ونحن ندعى أن الحركة التذبذبية للظل هي في الواقع حركة توافقية بسيطة . ولإثبات ذلك اعتبر تسارع الظل في اتجاه المحور x .

يلاحظ أن إحداثي الظل x في الجزء أ هو نفس الإحداثي x في الجزء ب ، ولكن تسارع الكرة في الاتجاه x (وتسارع الظل أيضا) هو مركبة تسارع الجذب المركزي في اتجاه المحور x . وبالأستعانة بالجزء ب يمكننا أن نقتنع بأن مركبة التسارع في الاتجاه x هي :

$$\text{تسارع الظل} = -\frac{v_0^2}{x_0} \cos \theta$$

وتبين لنا الإشارة السالبة أن التسارع في هذه الحالة متجه في الاتجاه $-x$ -بالإضافة إلى ذلك نجد من الجزء ب أن $\cos \theta = x/x_0$ ، أى أن :

$$\text{تسارع الظل} = -\left(\frac{v_0^2}{x_0}\right)x$$

لاحظ أن هذا التسارع يشبه كثيرا التسارع في الحركة التوافقية البسيطة المعطى بالمعادلة (١٣ - ٥) : نستنتج من هذا إذن أن :

$$\text{التسارع في الحركة التوافقية البسيطة} = -\left(\frac{k}{m}\right)x$$

دائرة الاسناد
يمكننا إذن أن نستنتج أن حركة الظل هي نفس حركة الكتلة المثبتة في نهاية زنبرك . ولكي تكون الحركتان متماثلتين يجب أن يكون نصف قطر الدائرة مساويا لسعة الحركة . وفي هذه الحالة يجب اختيار السرعة اللاتجاهية للكرة بحيث تكون :

$$\frac{v_0^2}{x_0^2} = \frac{k}{m}$$

أو :

$$v_0 = x_0 \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (١٣ - ٦)$$

ويمكنك أن تلاحظ من السياق أن المعادلة (١٣ - ٦) حالة خاصة للمعادلة (١٣ - ٤) . لنستخدم الآن هذا التشابه بين الحركة الدائرية والحركة التوافقية البسيطة للحصول على تعبير لتردد الحركة .

وإذا أردنا حساب الزمن اللازم للكتلة المهتزة المثبتة في الزنبرك لكي تعمل اهتزازة كاملة واحدة ، فإن هذا سيكون كافياً تماماً لحساب الزمن للكتلة المتحركة في دائرة لكي تدور دورة كاملة . عندئذ سيكون الزمن الذي تستغرقه الكتلة المتحركة في دائرة لكي تدور دورة كاملة على محيط دائرة نصف قطرها r أى الزمن الدورى هو :

$$\tau = \frac{2\pi r}{v_0} = 2\pi \frac{x_0}{v_0}$$

ولكننا نعلم مع ذلك من المعادلة (١٣ - ٦) أن :

$$v_0 = x_0 \sqrt{\frac{k}{m}}$$

إذن ، يعطى الزمن الدورى بالمعادلة :

(١٣ - ٧) الزمن الدورى للاهتزاز

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

وتردد الاهتزاز f هو ببساطة $1/\tau$. وحيث أننا قد استخدمنا العلاقة $F = ma = -kx$ في اشتقاق هذه العلاقة ، فإن وحدات k يجب أن تكون النيوتن لكل متر أو الباوند لكل قدم .

يلاحظ أن المعادلة (١٣ - ٧) هي المعادلة العامة لزمن اهتزاز أى كتلة m تتحرك حركة توافقية بسيطة . وعليه فإن زمن اهتزاز أى نظام يتبع قانون هوك وكتلته m يعطى بالمعادلة (١٣ - ٧) ، سوف نرى فيما بعد أن هذا ينطبق على أنظمة أكثر تعقيداً من الزنبركات البسيطة .

مثال توضيحي ١٣ - ٢ : أوجد زمن اهتزاز النظام المعطى في المثال التوضيحي ١٣ - ١ .

طريقة الحل . علمنا من المثال التوضيحي ١٣ - ١ أن :

$$k = 24.5 \text{ N/m}$$

و :

$$m = 2.0 \text{ kg}$$

بتطبيق المعادلة (١٣ - ٧) نجد أن :

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{2.0}{24.5}} \approx 1.8 \text{ s}$$

١٣ - ٥ الاهتزاز الجيبي : الحركة التوافقية البسيطة

سنحاول الآن اشتقاق معادلة رياضية بسيطة لأي كتلة تتحرك حركة توافقية بسيطة . لقد رأينا أن الظل المهتز في الشكل ١٣ - ٥ يتحرك حركة توافقية بسيطة ، ويمكننا بسهولة إيجاد قيمة الازاحة x من الجزء ب من الشكل . نرى إذن أن :

$$x = x_0 \cos \theta$$

ولكن θ تتغير باستمرار أثناء حركة الكرة حول محيط دائرة الإسناد . وحيث أن معادلات الحركة تنص على أن :

$$\theta = \omega t$$

إذن :

(١٣ - ٨)

$$x = x_0 \cos \omega t$$

حيث تقاس السرعة الزاوية ω بالزوايا النصف قطرية في الثانية . وإذا أردنا التعبير عن اجابتنا بدلالة f ، أي التردد بالدورات في الثانية (أو ، في هذه الحالة ، الاهتزازات في الثانية) ، يجب أن نستخدم العلاقة :

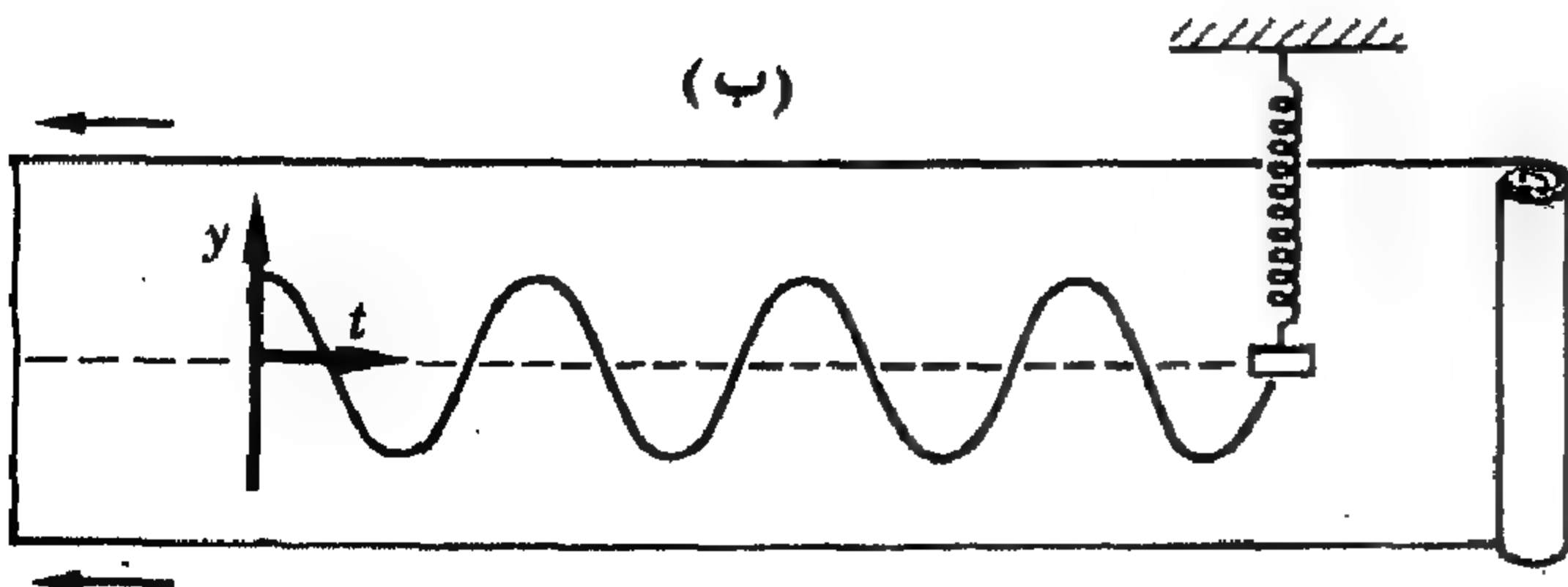
(١٣ - ٩)

$$\omega = 2\pi f$$

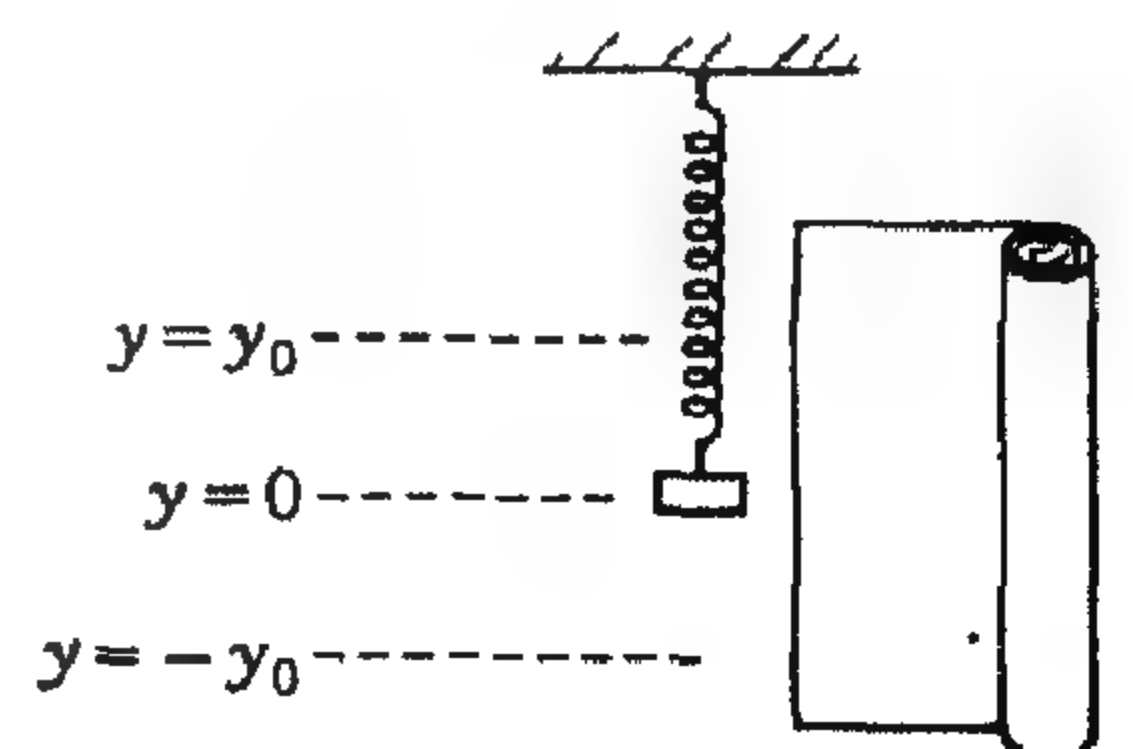
لأن 1 rev تكافئ $2\pi \text{ rad}$.

تنص المعادلة (١٣ - ٨) على أن الكتلة المهتزة في حركة توافقية بسيطة تفعل مايفعله جيب تمام الزاوية ωt . ولكي ترى مايسلزمه هذا النوع من الاهتزاز ، اعتبر التجربة الموضحة في الشكل ١٣ - ٦ .

شكل (١٣ - ٦)
ترسم الكتلة المهتزة منحني
جيب تمام كدالة للزمن .



(أ)



يمثل هذا الشكل ثقلا معلقا في زنبرك . فإذا رفع الجسم إلى الموضع y_0 ثم ترك حرا ، فإنه سوف يتحرك حركة توافقية بسيطة سعتها y_0 . يوضع شريط من الورق خلف الجسم لكي يسجل عليه الجسم مواضعه أثناء اهتزازة إلى أعلى وإلى أسفل . فإذا جذب الشريط إلى اليسار بمعدل ثابت فإن الجسم سوف يرسم عليه منحنى يمثل حركته . وهذا موضح في الجزء السفلي من الشكل .

لنبدأ في حساب الزمن ابتداء من لحظة تحرير الجسم . وهذه هي نهاية المنحنى في الجهة اليسرى . وسنعتبر أن الزمن عند هذه النقطة هو $t=0$. وفي لحظة لاحقة أخرى سوف يحتل الجسم الموضع الميمن في الشكل . ومن ثم يمكننا أن نعتبر أن هذا المنحنى يمثل الرسم البياني لازاحة الجسم y كدالة للزمن وطبقا للمعادلتين (١٣ - ٨) و (١٣ - ٩) ، يمكننا كتابة معادلة هذا المنحنى كالتالى :

$$(١٣ - ١٠) \quad y = y_0 \cos \omega t = y_0 \cos 2\pi f t = y_0 \cos \frac{2\pi t}{T}$$

ويسمى هذا المنحنى بالمنحنى الجيبي ، وتسمى الحركة التى تسببه الحركة الجيبية . ومن الواضح أن الحركة التوافقية البسيطة والحركة الجيبية شئ واحد .

١٣ - ٦ البندول البسيط

نعلم أن البندول البسيط الميمن في الشكل ١٣ - ٧ يتحرك حركة توافقية بسيطة . فإذا كانت قوة الاستعادة المؤثرة على الجسم تتناسب مع الازاحة فإن هذا يعنى أن قانون هوك ينطبق على الجسم وأن اهتزازة هو حركة توافقية بسيطة كما رأينا سابقا . سنحاول الآن إيجاد قوة الاستعادة في حالة البندول البسيط .

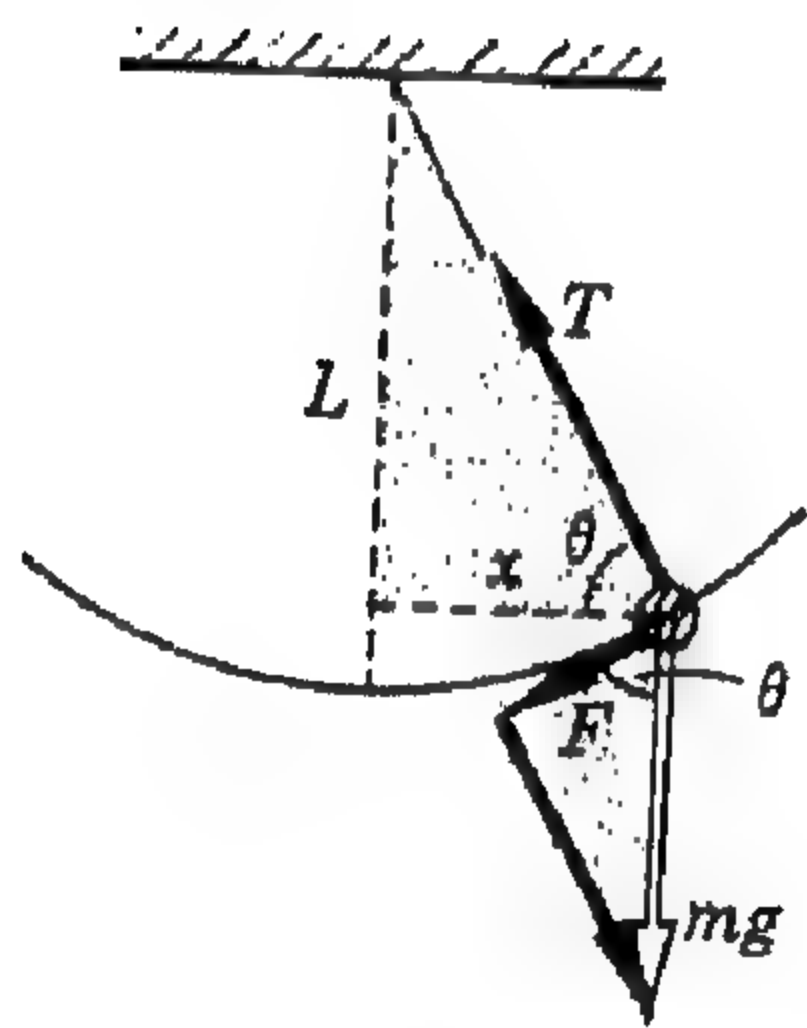
واضح من الشكل أن كرة البندول تتحرك على قوس من دائرة . وحيث أن الشد في خيط البندول عمودى دائما على هذا القوس ، فإن الشد T لا يؤثر على الحركة ، وذلك أن وزن كرة البندول mg هو الذى يسبب الحركة . ومع ذلك فإن مركبة واحدة فقط من مركبتى الوزن ، وهى المركبة المماسية لقوس الدائرة F ، هى التى تسبب الحركة الاهتزازية للبندول . ومن الشكل ١٣ - ٧ نجد أن :

$$F = -mg \cos \theta$$

حيث استخدمت الإشارة السالبة لنبين أن F هى قوة استعادة . ولكن يمكننا أن نرى أيضا من الشكل أن $\cos \theta = x/L$ ، إذن :

$$(١٣ - ١١)$$

$$F = -\frac{mg}{L}x$$



شكل (١٣ - ٧)

الزاويتان θ متساويتان . لاحظ أيضا أنه إذا لم يكن ارتجاج البندول كبيرا جدا ، فإن مركبة F فى الاتجاه x (هو الاتجاه x لقوة الاستعادة) تكون قوية من F ذاتها .

هذه المعادلة تشبه قانون هوك :

$$F = -kx$$

باستثناء تفصيل واحد . ففي قانون هوك يجب أن تكون الازاحة في عكس اتجاه القوة . ونحن نرى من الشكل ١٣ - ٧ أن هذا ليس صحيحا في هذه الحالة ، لأن F و x ليسا في نفس الخط تماما . ومع ذلك ، إذا كانت زاوية ارتجاج البندول صغيرة جدا فإن F و x ستكونان في نفس الخط تقريبا : إذن ، إذا لم يكن ارتجاج البندول واسعا جدا فإن البندول يتبع قانون هوك . وهذا التقريب سوف يتحرك البندول حركة توافقية بسيطة . وبمقارنة المعادلة (١٣ - ١١) بقانون هوك سنجد أن ثابت الزنبرك k في حالة البندول هو :

$$k = \frac{mg}{L}$$

وبالتعويض عن قيمة k من المعادلة السابقة في الصيغة العامة للزمن الدوري لجسم يتحرك حركة توافقية بسيطة ، أى المعادلة (١٣ - ٧) ، نحصل على :

(١٣ - ١٢)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

الزمن
الدوري
للبندول

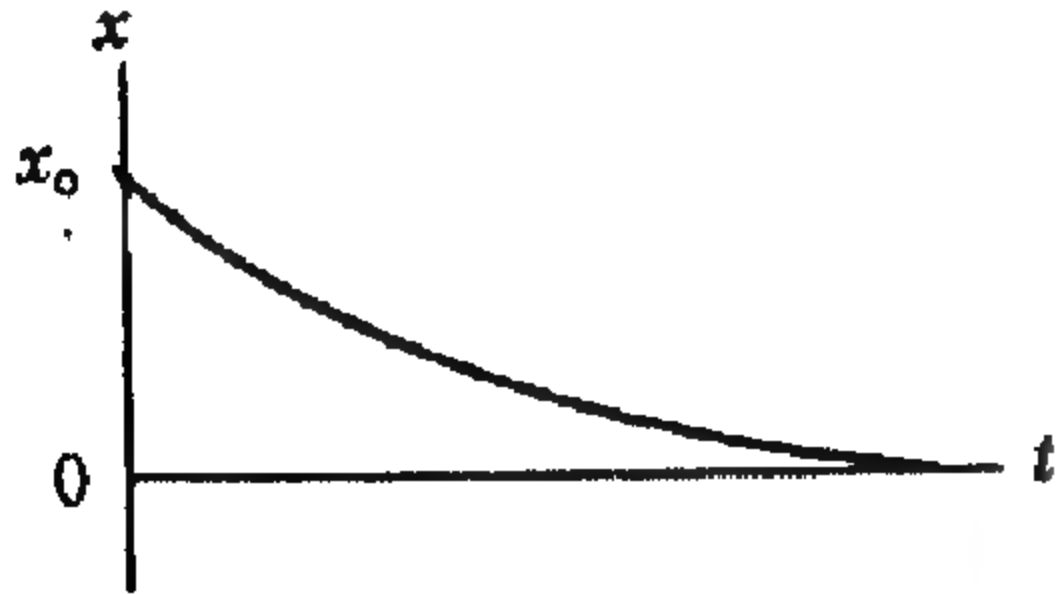
لاحظ أن الزمن الدوري للبندول البسيط لا يعتمد على كتلة ثقل البندول ، ولكنه يعتمد فقط على طول البندول وتسارع الجاذبية g . وعليه ، يمكننا قياس g بدقة كبيرة باستخدام البندول البسيط . فإذا كان طول البندول معلوما وقسنا زمن الاهتزاز يمكننا حساب قيمة g مباشرة من المعادلة (١٣ - ١٢) . ويمكن أن تكون هذه الطريقة لتعيين g دقيقة جدا إذا اتخذت الاحتياطات اللازمة .

١٣ - ٧ الاهتزازات القسرية

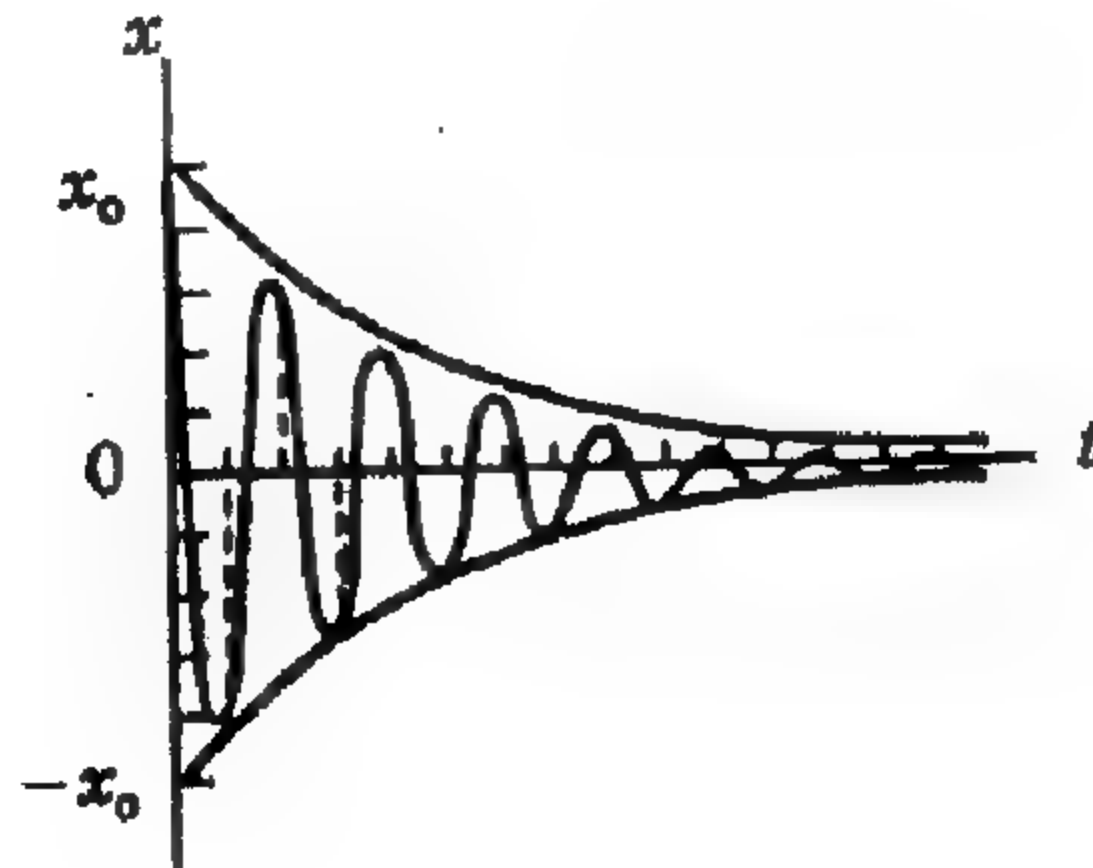
في أى نظام مهتز حقيقى تفقد دائما بعض الطاقة ضد قوى الاحتكاك . نتيجة لذلك تقل سعة اهتزاز البندول أو الكتلة المثبتة في نهاية الزنبرك باستمرار بمرور الوقت . وهذه الحقيقة موضحة في الشكل (١٣ - ٨) .

شكل (١٣ - ٨)

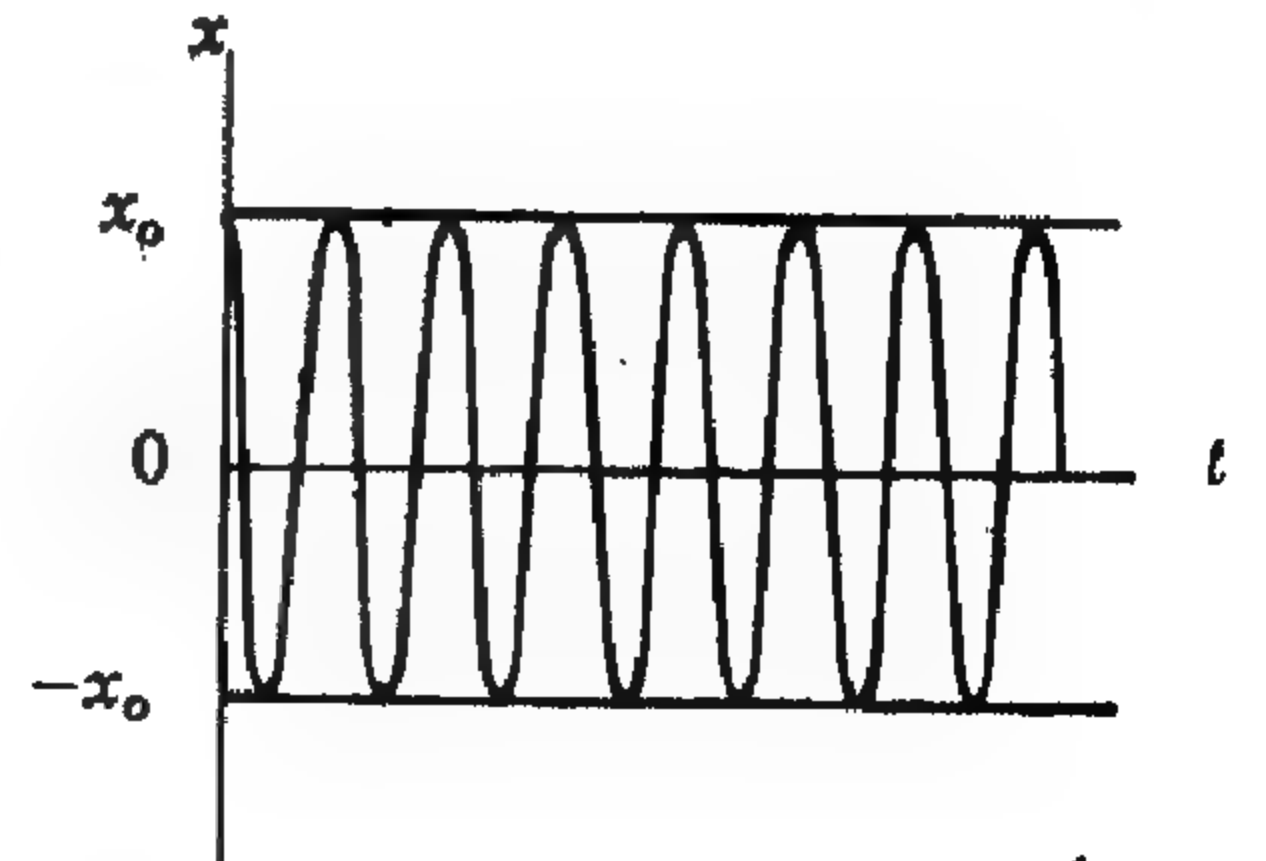
يعتمد الاهتزاز الحر لنظام على مقدار الطاقة المفقودة فيه .



(أ) اهتزاز غير متضائل



(ب) اهتزاز ناقص المضاعلة



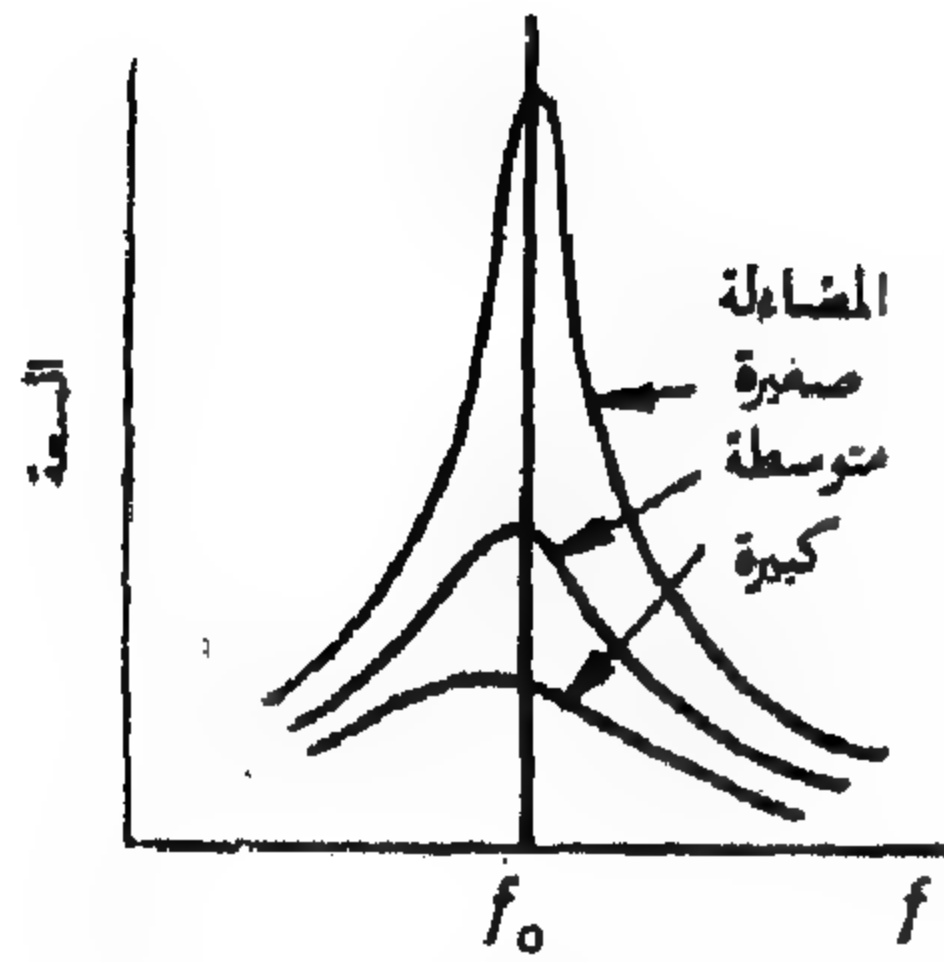
(ج) اهتزاز زاد المضاعلة .

ويمثل الجزء أ الحالة المثالية لاهتزاز نظام لا احتكاكي ، وهذه هي الحالة التي ناقشناها في الأجزاء السابقة . أما الجزء ب فإنه يمثل حالة أكثر واقعية ، حيث يتأثر الاهتزاز بشدة نتيجة لوجود قوى الاحتكاك . ويقال أن مثل هذا النظام متضائل وأن النظام يتضاءل بسرعة كبيرة .

وإذا كانت قوى الاحتكاك كبيرة جدا فإن النظام لن يهتز على الإطلاق . وبدلاً من ذلك يعود النظام ببساطة إلى موضع توازنه ببطء ، كما هو مبين في الشكل ١٣ - ٨ ج . وعندئذ يقال أن هذا النظام زائد المضائلة . ويمكن أن يحدث ذلك إذا كانت الكتلة المثبتة في نهاية الزنبرك مغمورة في سائل لزج جدا . وفي هذه الحالة لن تهتز الكتلة على الإطلاق . وعندما تكون قوى الاحتكاك كبيرة بدرجة كافية لأن تمنع اهتزاز النظام ، يقال عندئذ أن النظام خرج المضائلة .

لكي يهتز النظام الحقيقي لفترة زمنية طويلة لابد أن يزود النظام بالطاقة باستمرار لتعويض الطاقة المفقودة في بذل شغل الاحتكاك . فمثلاً ، لكي تستمر أرجوحة الطفل في الارتجاج بسعة ثابتة ، لابد أن تدفع الأرجوحة من وقت لآخر لإضافة الطاقة إلى النظام . وهذا حقيقى لجميع الأنظمة المهتزة . إذن لابد من استخدام عامل خارجى لإمداد النظام بالطاقة لكي يستمر النظام في الاهتزاز دون مضائلة .

ونحن نعلم جميعاً أن هناك طريقة صحيحة وأخرى خاطئة لدفع الأرجوحة إذا أريد أن ترتفع الأرجوحة عالياً . ذلك أننا يجب أن ندفع الأرجوحة في اتجاه حركتها وليس عكسها . وهذه الطريقة فقط يمكن تزويد النظام بطريقة فعالة . وفي الحقيقة ، إذا دفعت الأرجوحة في عكس اتجاه الحركة فإن الاهتزاز قد يتوقف في نهاية الأمر لأن الجسم المهتز يجب أن يبذل عندئذ شغلاً على العامل الدافع وهذه الحقائق البسيطة ذات أهمية كبيرة في جميع الأنظمة المهتزة اهتزازاً قسرياً .



شكل (١٣ - ٩)
رنين الأنظمة المهتزة نتيجة
لقوة حافزة متغيرة التردد .

يستمر النظام المقود عادة في الاهتزاز بواسطة قوة تكرارية تؤثر على النظام ، وقد يكون تردد هذه القوة f مساوياً أو غير مساوٍ للتردد الطبيعي لاهتزاز النظام f_0 . وتصل فعالية العامل الحافز في إمداد النظام بالطاقة إلى أقصاها إذا كان $f = f_0$.

ولكن تأثيره يكون أقل فاعلية في إمداد النظام بالطاقة عند جميع الترددات الأخرى ، وهذا لأن القوة الحافزة لا تكون دائماً متفقة في الطور مع حركة النظام . ويوضح الشكل ١٣ - ٩ تغير سعة اهتزاز النظام مع تردد القوة الحافزة . لاحظ كما قلنا سابقاً ، أن فاعلية القوة الحافزة في إمداد النظام بالطاقة تكون أكبر ما يمكن عندما يكون التردد f مساوياً للتردد الطبيعي للنظام f_0 . وفي هذه الحالة يقال أن القوة في حالة رنين مع النظام . وسوف نتكلم أكثر من ذلك عن التردد f_0 ، وهو ما يسمى تردد الرنين للنظام ، في الفصل التالى عند مناقشة الاهتزاز الرنينى للأوتار .

ملخص

في الانظمة المهتزة تتحول الطاقة تبادليا من طاقة حركة إلى طاقة وضع . مجموع هاتين الطاقتين ثابت بشرط عدم وجود أى عوامل مبددة للطاقة . الطاقة المخزنة في زنبرك تساوى $\frac{1}{2}kx^2$ ، حيث k ثابت الزنبرك .

عندما يتعرض نظام إلى قوة الاستعادة المعطاة بقانون هوك فإنه يتحرك حركة توافقية بسيطة (SHM) . في حالة النظام « زنبرك - كتلة » يعطى تسارع الكتلة بالعلاقة $F = ma$ ويساوى $a = -(k/m)x$. سرعة الكتلة عند أية ازاحة x يمكن إيجادها من معادلة اتران الطاقة ، أى المعادلة $\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_0^2$.

عندما تتحرك كرة على دائرة بسرعة لا اتجاهية ثابتة يتحرك ظلها حركة توافقية بسيطة . يمكننا استخدام حركة الكرة على دائرة الإسناد لحساب الزمن الدورى للحركة التوافقية البسيطة . يعطى الزمن الدورى لاهتزاز كتلة مثبتة في نهاية زنبرك بالمقدار $2\pi\sqrt{m/k}$.

تعتبر حركة البندول البسيط تقريبا للحركة التوافقية البسيطة بشرط أن تكون زاوية ارتجاعه صغيرة . يعطى الزمن الدورى للبندول البسيط بالمقدار $2\pi\sqrt{L/g}$.

تعتمد سعة الحركة التوافقية البسيطة على تردد القوة الحافزة . يحدث الرنين إذا كان تردد القوة الحافزة مساويا للتردد الطبيعى للنظام . عندئذ تكون سعة الأمتزازة أكبر ما يمكن .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

- ١ - توضيح معنى للكلمات الآتية بالنسبة إلى كتلة تهتز في طرف زنبرك : السعة ، الازاحة ، التردد ، الزمن الدورى .
- ٢ - شرح العلاقة بين طاقة الحركة وطاقة الوضع والطاقة الكلية لنظام يهتز .
- ٣ - حساب الطاقة المخزنة في زنبرك بدلالة ثابت الزنبرك ومقدار امتداده أو انضغاطه .
- ٤ - استخدام قانون بقاء الطاقة لاثبات العلاقة $\frac{1}{2}kx_0^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$. استخدام هذه العلاقة لإيجاد سرعة الكتلة المثبتة في طرف زنبرك .
- ٥ - استخدام القانون $F = ma$ لاثبات أن تسارع الكتلة المثبتة في طرف زنبرك تعطى بالعلاقة $a = -(k/m)x$.
- ٦ - ذكر أهمية قانون هوك بالنسبة إلى الحركة التوافقية البسيطة .
- ٧ - شرح ارتباط الحركة على دائرة إسناد بالحركة التوافقية البسيطة .
- ٨ - إيجاد التردد الطبيعى والزمن الدورى لاهتزاز كتلة مثبتة في طرف زنبرك .
- ٩ - شرح سبب تسمية الحركة التوافقية البسيطة بالحركة الجيبية . كتابة معادلة المنحنى الجيبى وشرح الكميات الموجودة فيه .
- ١٠ - شرح سبب ظهور قوة الاستعادة في حالة البندول البسيط ، وشرح لماذا تعتبر حركة البندول حركة توافقية بسيطة تقريبا . كتابة معادلة الزمن الدورى للحركة .
- ١١ - شرح معنى المصطلحات التالية فيما يتعلق بالاهتزاز القسرى : متضائل ، زائد المضاءلة ، حرج المضاءلة ، رنين . تخطيط رسم يبانى يوضح العلاقة بين سعة الاهتزاز وتردد الاهتزاز المقود (أو القسرى) .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

$$f = 1/\tau$$

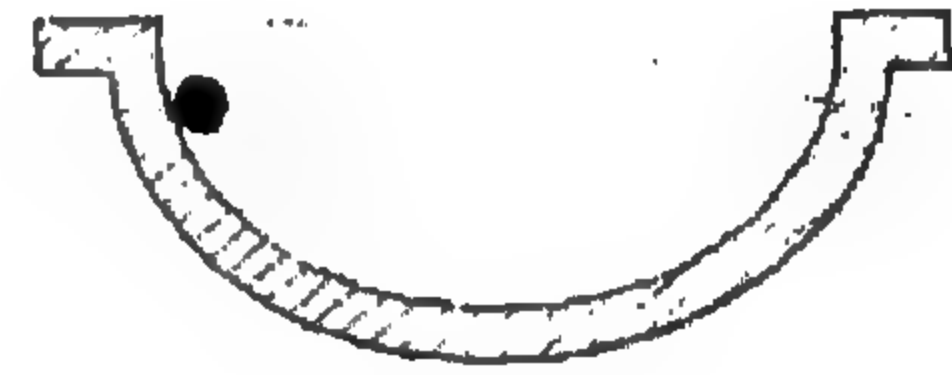
السعة
الازاحة
وحدة الهرتز (Hz)
ثابت الزنبرك k
SHM
 $PE = \frac{1}{2}kx^2$
دائرة الاسناد
 $\tau = 2\pi \sqrt{m/k}$
الحركة الجيبية
 $x = x_0 \cos(2\pi ft)$
 $\tau = 2\pi \sqrt{L/g}$
مضاءلة حرجة
التردد الطبيعي للرنين

اسئلة وتخمينات

- ١ - ماهى الشروط الاساسية الواجب توافرها فى النظام اللاحتكاكى لكى يتحرك حركة توافقية بسيطة ؟
- ٢ - تدحرجت كرة صغيرة (محمل كريات مثلا) فى قصعه خلط كما هو مبين فى الشكل . ١٣ - ١ . اشرح لماذا تحدث الحركة الاهتزازية فى (أ) ولا تحدث فى (ب) . ماذا يسبب ظهور قوة الاستعادة فى (أ) ؟ بماذا نجربنا قانون بقاء الطاقة عن (أ) إذا كانت قوى الاحتكاك مهملة ؟



(ب)



(أ)

شكل (م ١٣ - ١)

- ٣ - هل تتحرك الكرة تامة المرونة المرتدة من أرضية صلبة حركة توافقية بسيطة ؟ هل هناك اى تشابه على الاطلاق ؟ اشرح اجابتك .
- ٤ - هل تغيير الطاقة تبادليا بين طاقه الوضع وطاقه الحركة فى جميع الاجسام المهتزة التى لا تعاني أى فواقد احتكاك ؟ اشرح .
- ٥ - هناك طريقة شائعة لتحرير السيارة المتعطله وهى أن تهر هذه السيارة أماما وخلفا مع النقل المناسب للتروس من الامامى إلى الخلفى ثم من الخلفى إلى الامامى مرات عديدة . ناقش الأساس الفيزيائى لهذه الطريقة مع الاهتمام خصوصا بانتقال الطاقة .
- ٦ - علق ثقلان متساويان سويا فى نهاية زنبرك واحد ثم وضع النظام فى حالة اهتزاز . ماذا يحدث لسعة وتردد والسرعة القصوى لنهاية الزنبرك إذا وقع الحد الثقليين (أ) عندما كانت استطالة الزنبرك اقصى ما يمكن ، (ب) عندما كانت الكتلة تمر بالموضع المركزى ؟
- ٧ - هل تعمل ساعة بندولية مضبوطة عند مستوى سطح البحر بدقه فى مدينة ارتفاعها حوالى ميل عن سطح البحر كمدينة دنفر مثلا ؟
- ٨ - هناك ترددات مميزة لاهتزاز اجزاء مختلفة من جسم الانسان كالارتجاج الحر للذراع أو الساق مثلا . ناقش كيف تؤثر هذه الترددات الطبيعية على طريقة مشى أو جرى الإنسان ، قدر هذه الترددات .

٩ - ناقش تأثير خصائص تصميم لوح القفز اوالترايبولين على ملائمته للغرض وطريقة عمله .

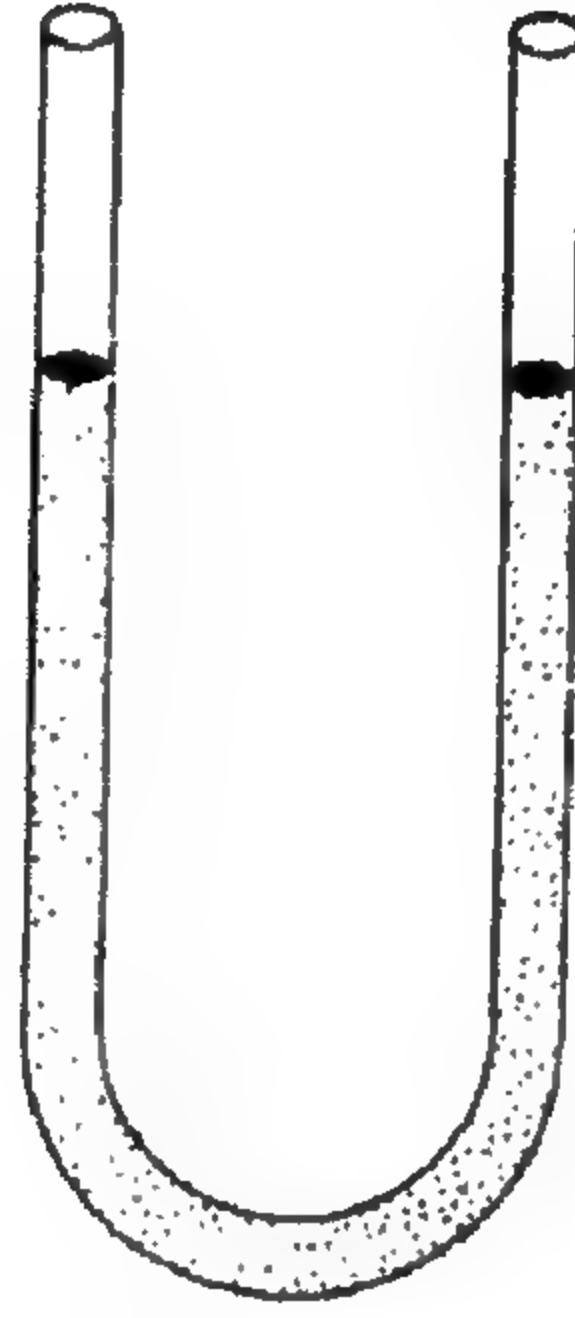
١٠ - عندما تكون عجلات السيارة غير متزنة قد تهتز السيارة بشدة عند سرعة معينة . اشرح لماذا ؟

١١ - افترض ان ثقل البندول عبارة عن كرة مجوفة . هل تتغير خواص البندول اذا كانت الكرة مملوءة بالماء تماما ؟ أو مملوءة إلى الربع فقط ؟

١٢ - قدر التردد الطبيعي لاهتزاز سيارة إلى أعلى وإلى أسفل على زنبركاتها . تحت أى شروط يصبح هذا التردد الطبيعي هاما ؟ (ق)

١٣ - ثبت أنبوبة زجاجية (نصف قطرها الداخلى 1 cm) لتصبح انبوبة على شكل الحرف U طول كل من فرعيها 40 cm وطول قاعها حوالى 10 cm (انظر الشكل م ١٣ - ٢) .

قدر التردد الطبيعي لاهتزاز عمود من السائل في الانبوبة إلى أعلى وإلى أسفل عندما تكون الأنبوبة U مملوءة إلى ارتفاع قدر 30 cm (أ) بالماء ، (ب) بالزئبق . (ق)



شكل (م ١٣ - ٢)

مسائل :

١ - كما ترى في الشكل م ١٣ - ٣ ، تهتز كتلة بين النهايتين اللتين ترتفعان عن سطح الأرضية بمقدار 10.0 cm و 24.0 cm ، وتصل الكتلة إلى النقطة 20 مرة في الدقيقة . ما هو (أ) التردد ، (ب) الزمن الدورى ، (ج) سعة الحركة الاهتزازية للنظام ؟

٢ - علقت كتلة قدرها 20 g في نهاية زنبرك رأسى ، وعندما اضيفت اليها كتلة قدرها 30 g زاد امتداد الزنبرك بمقدار 15.0 cm . (أ) ماهو ثابت الزنبرك لهذا النظام ؟ (ب) ماهو الزمن الدورى الطبيعي بعد اضافة الكتلة 30 g ؟

٣ - علقت كتلة قدرها 2.0 g في طرف سلك رأسى مصنوع من الصلب طوله 15.0 cm ومساحة مقطعه $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$. (أ) مامقدار استطالة السلك تحت تأثير هذا الحمل ؟ (ب) ماهو التردد الطبيعي للاهتزاز الرأسى للكتلة المعلقة في طرف السلك ؟ (معامل يونج للسلك $19 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$) .

٤ - لاحظ طفلان أن بإمكانهما هز سيارة إلى أعلى وإلى أسفل بدفعها دوريا إلى أسفل ، وكانت السيارة تهتز ثمانى دورات كاملة في زمن قدره 13.0 s (أ) بفرض أن كتلة السيارة 1800 kg ، أوجد ثابت الزنبرك لنظام التعليق ، (ب) إذا كانت هذه القيمة صحيحة ، ماهى المسافة التى تخفضها السيارة بالتقريب إذا دخل شخص في السيارة . وجلس في مقعدها الأمامى ؟

٥ - يستطيل زنبرك معين يتبع قانون هوك بمقدار 20 cm تحت تأثير حمل وزنه 0.35 N . ماهو مقدار الطاقة المختزنة في الزنبرك عندما ينضغط بمقدار 5.0 cm ؟

٦ - علق جسم وزنه 4.0 lb في طرف زنبرك ($k=3.0 \text{ lb/in}$) فاستطال الزنبرك بمقدار 2 in من موضع اتزانه ثم ترك حرا . أوجد (أ) سرعة الثقل عندما يمر بموضع التوازن ، (ب) تسارعه في لحظة إطلاقه حرا مباشرة .

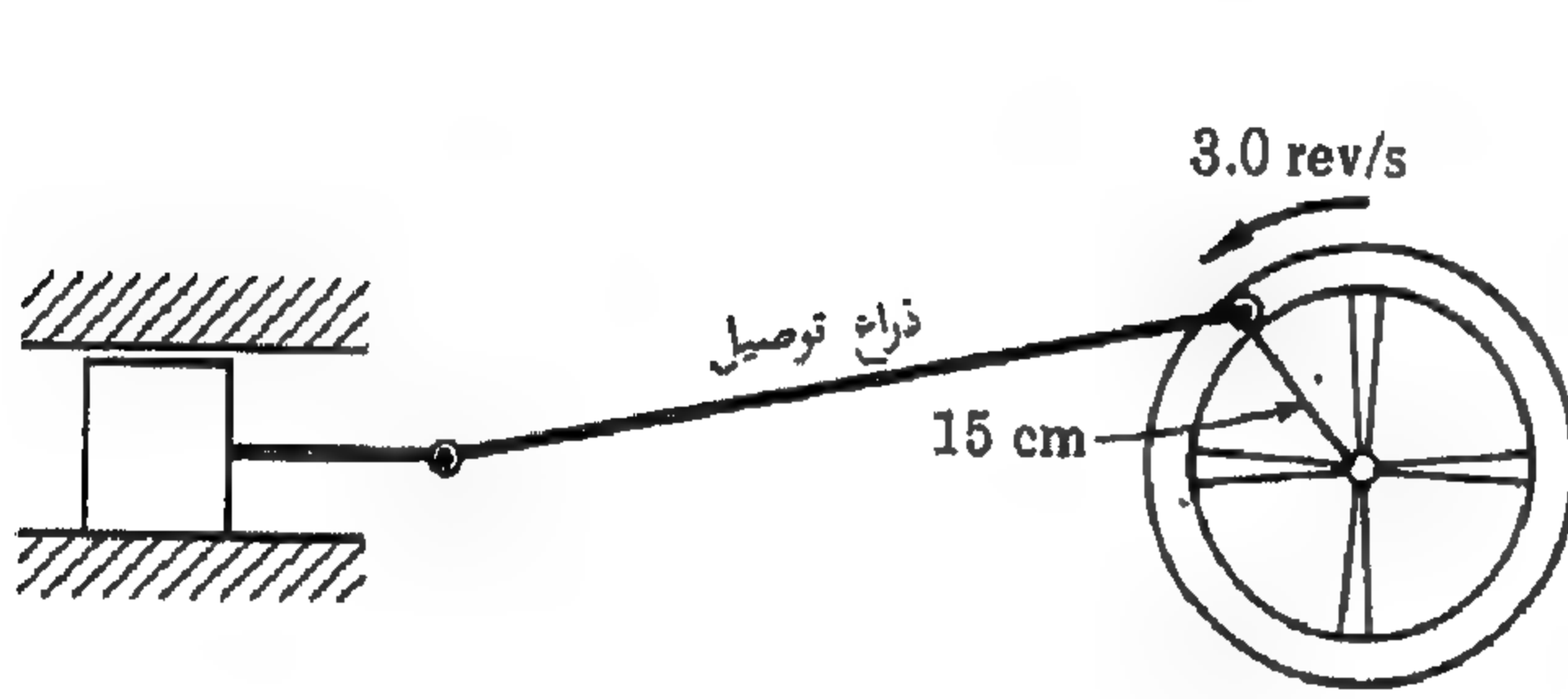
٧ - علقت كتلة قدرها 200 g في طرف زنبرك ($k=0.60 \text{ N/m}$) ثم جذبت إلى أسفل مسافة قدرها 3.0 cm من موضع التوازن ثم أطلقت . ماهو (أ) التسارع الابتدائي للكتلة ، (ب) سرعتها عند مرورها بموضع التوازن ؟

٨ - ينزلق نظام « كتلة - زنبرك » على سطح أفقى لا احتكاكى (كما في الشكل ١٣ - ٣) وكانت قيمة الكتلة 50 g . وعندما طبقت قوة أفقية قدرها 0.70 N على النظام استطال الزنبرك بمقدار 4.0 cm . (أ) ماهو تسارع الكتلة في لحظة إطلاق النظام حراً ؟ (ب) ماهى سرعة الكتلة عند مرورها بموضع التوازن ؟

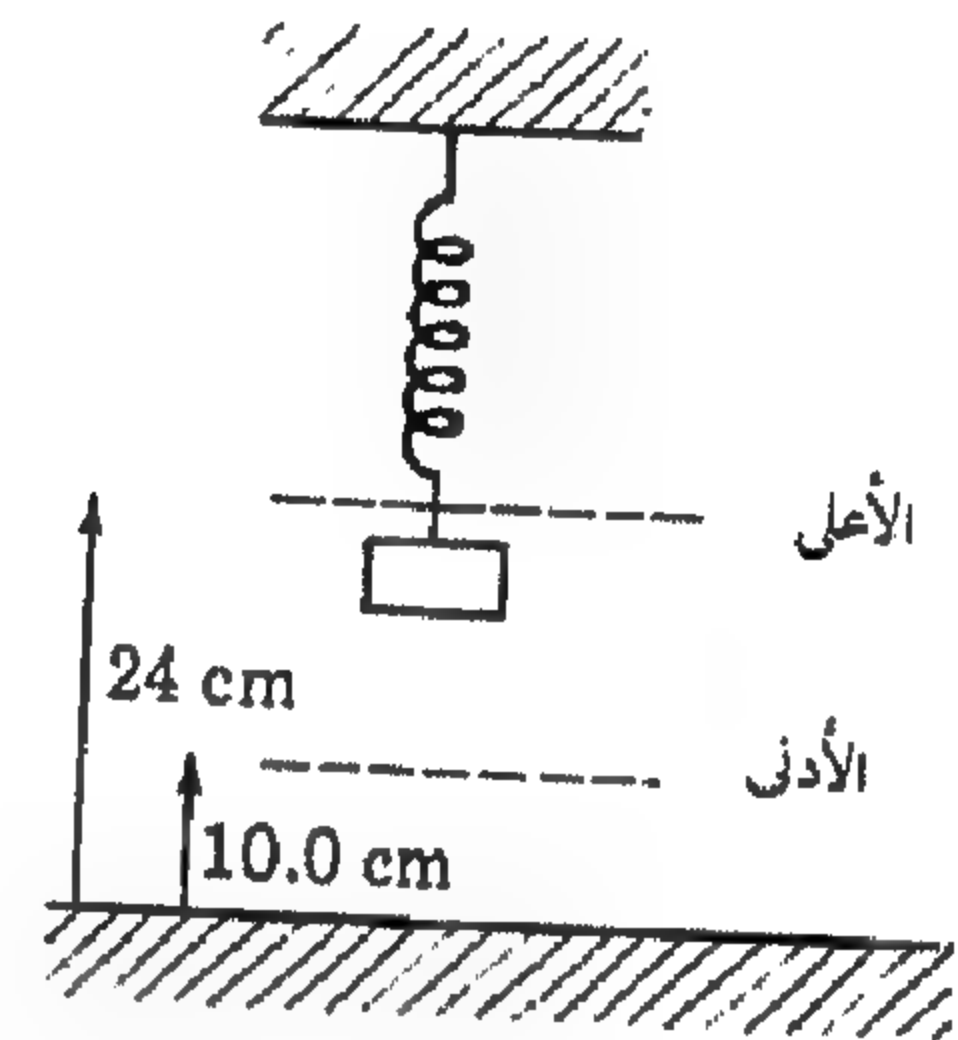
٩ - ترى في الشكل م ١٣ - ٤ عجلة دوارة تقوم بتشغيل كباس . أوجد الكميات الآتية التى تصف حركة الكباس الموضح بالشكل : (أ) التردد ، (ب) السعة ، (ج) السرعة القصوى ، (د) السرعة عندما يكون ذراع التوصيل أفقياً .

١٠ - اكتب معادلة حركة الكباس المبين في الشكل م ١٣ - ٤ في الصورة $x = x_0 \cos \omega t$ باستخدام القيمتين العدديتين للمقدارين x_0 و ω .

١١* - أوجد مقدار تسارع الكباس المبين في الشكل م ١٣ - ٤ (أ) عندما تكون ذراع التوصيل أفقية ، (ب) عندما يكون نصف القطر الموصل بين مركز العجلة ونقطة الدوران رأسياً ، (ج) عندما يصنع القطر الموصل بين مركز العجلة ونقطة الدوران زاوية قدرها θ مع الرأسى .



شكل (١٣م - ٤)



شكل (١٣م - ٣)

١٢ - تتذبذب كتلة قدرها 2.0 kg في حركة توافقية بسيطة في نهاية زنبرك وكانت سعة الحركة 30 cm وثابت الزنبرك 400 N/m . أوجد سرعة الكتلة عندما تكون ازاحتها (أ) 30 cm ، (ب) 0 cm ، (ج) 15 cm .

١٣** - يتحرك كباس حركة توافقية بسيطة سعتها 8.0 cm وترددها f . وتستقر حلقة (وردة) حرة على السطح العلوى للكباس . وقد لوحظ أن الحلقة تتحرك مع الكباس إلى أعلى وإلى أسفل عند الترددات المنخفضة للكباس . أما عند الترددات العالية جداً فإن الحلقة تطفو فوق الكباس عندما يبدأ في الحركة إلى أسفل . (أ) ماهو أقصى تسارع للكباس عندما تبدأ الحلقة في الانفصال عنه ؟ (ب) ماهو أقل تردد يحدث عنده هذا الانفصال ؟

١٤ - بندول بسيط زمنه الدورى 1.000 s . (أ) ما طول هذا البندول ؟ (ب) إذا كان ثقل البندول عبارة عن كرة . من أين يقاس الطول ، من قمة الكرة أم من مركزها ؟

١٥ - بندول بسيط طوله 6.0 in . (أ) بأي تردد يهتز البندول ؟ (ب) إذا أطلق البندول حراً عندما كان يصنع زاوية قدرها 37° مع الرأسى ، ماهى سرعة ثقل البندول عندما يمر بالنقطة المركزية ؟

١٦ - ساعة حائط ذات بندول أخذت إلى القمر حيث تزن الاجسام حوالى سدس وزنها على الأرض . ماهو الزمن اللازم لكى تقرأ ساعة واحدة على تدريجها ؟

١٧ - حبل غسيل مثبت من طرفيه في قائمين كبيرين . وعندما علق ثقل قدره 2 lb من النقطة المركزية للخط ارتنخى بمقدار 3.0 in . وعندما استبدل بهذا الثقل ثقل آخر مقداره 4.0 lb ارتنخى الخط بمقدار 6.0 in . فإذا علق الثقل 2 lb عليه وجذب إلى أسفل مسافة إضافية قدرها 2.0 in أوجد (أ) تردد الاهتزازة ، (ب) سرعة الجسم عند مروره بنقطة التوازن .

١٨ - ثبتت كتلة قدرها m موضوعه على منضدة لا احتكاكية في طرفي زنبركين كما هو موضح في الشكل م ١٣ - ٥ . اثبت أن تردد اهتزاز هذا الجهاز هو :

$$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{d}}$$

حيث d مقدار استطالة كل من الزنبركين تحت تأثير وزن الكتلة m .

١٩** - وضع زنبرك ثابتته 15 N/m رأسيا في أنبوبة ثم وضعت على نهايته العليا كتلة قدرها 20 g وتركت حتى وصلت إلى السكون . سنعتبر أن هذا الموضع هو الموضع الصفري . وبعد ذلك دفعت هذه الكتلة مسافة قدرها 10.0 cm في الأنبوبة إلى أسفل باستخدام رافعة . إلى أى ارتفاع فوق الموضع الصفري سوف تصل الكتلة عندما يترك الزنبرك حرا ؟ (ساو طاقة الوضع المخزنة في الزنبرك بطاقه حركة الكتلة . ماذا يعنى ذلك بالنسبة للزنبرك ؟) .

٢٠* - غمر زنبرك منضغط بالكتلة المثبتة في طرفه في وعاء يحتوى على ماء في درجة 20.00°C وكانت السعة الحرارية للوعاء والزنبرك والكتلة والماء $60 \text{ cal}^\circ \text{C}^{-1}$. وعندما ترك الزنبرك حرا اهتز ذهابا وإيابا في الماء ولوحظ أن السعة تتناقص باستمرار نتيجة لقوى الاحتكاك (أو قوى اللزوجة) التى يسببها الماء . وعندما توقف الزنبرك عن الاهتزاز وجد أن درجة الحرارة 20.10°C . (أ) ماهى كمية الطاقة التى كانت مخزنة في الزنبرك ؟ (ب) وإذا كان مقدار انضغاط الزنبرك في البداية هو 8.0 cm فما هو ثابت الزنبرك ؟

٢١ - اثبت أن السرعة القصوى لثقل البندول تعطى بالعلاقة :

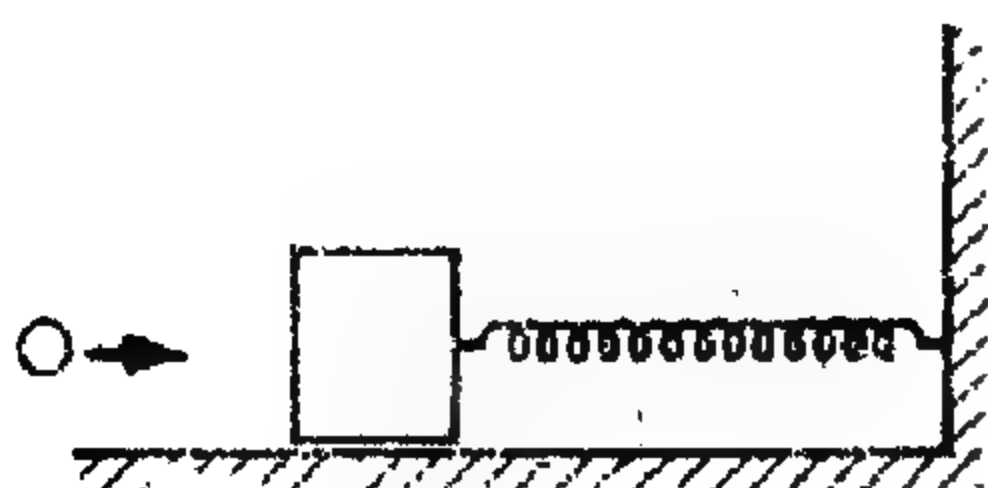
$$v = \sqrt{2gL(1 - \cos \theta)}$$

إذا كان البندول يبدأ في الارتجاج من زاوية قدرها θ مع الرأسى .

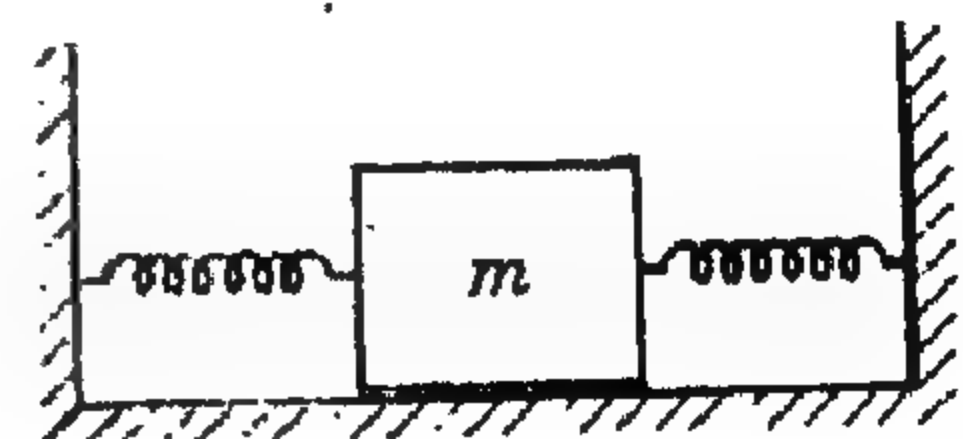
٢٢* - أزيح بندول بزاوية معينة ثم ترك حرا . وعندما مر ثقل البندول بالنقطة المركزية كان الشد في الخيط ضعف وزن ثقل البندول . اثبت أن الازاحة الزاوية الابتدائية هى 60° .

٢٣* - أطلقت رصاصة كتلتها 10 g بسرعة قدرها 100 cm/s في قالب كتلته 90 g مثبت في طرف زنبرك ثابتته 100 N/m كما هو مبين في الشكل فاستقرت في القالب . فإذا كان القالب ساكنا في البداية ، فما هى سعة اهتزاز الزنبرك بعد التصادم ؟ اهل قوى الاحتكاك بين القالب والمنضدة .

٢٤* - تهتز كتلة قدرها 2.0 kg مثبتة في نهاية زنبرك طبقا للعلاقة $y = 0.20 \cos(9.42t)$ ، حيث y بمقاسة بالسنتيمترات . أوجد (أ) سعة الاهتزاز ، (ب) تردد الاهتزاز ، (ج) ثابت الزنبرك ، (د) أقصى سرعة للكتلة .



شكل (م ١٣ - ٦)



شكل (م ١٣ - ٥)

الفصل الرابع عشر

الحركة الموجية

تستطيع الأجسام المهتزة التي ناقشناها في الفصل السابق توليد الموجات . وسواء كانت هذه الموجات في الهواء أو المعدن أو حتى الفراغ ، فإن هناك سمات مشتركة كثيرة بينها جميعا . وسوف نناقش في هذا الفصل المبادئ الأساسية للحركة الموجية عامة . وستخصص بعض الفصول اللاحقة لتطبيق هذه المبادئ على الصوت والضوء وأنواع أخرى من الموجات .

١٤ - ١ أهمية الحركة الموجية

تصدر الموجات من جميع الاجسام المهتزة تقريبا . وكلنا نعلم جيدا أن النغمات الموسيقية التي نستمع اليها من البيانو أو الكمان ما هي الا موجات تصدر نتيجة لاهتزاز أوتار مشدودة وتصل اليها خلال الهواء . والكلارينت أيضا يبعث الموجات الصوتية في الهواء ، ولكن مصدر الاهتزاز في هذه الحالة هو لسان المزمار الذي ينفخ فيه العازف . أما في البوق فإن الموجات تنشأ نتيجة لاهتزاز شفتى عازف البوق عند فم الآلة الموسيقية . وهناك مصادر كثيرة أخرى للأصوات الموسيقية كالطلبة والمثلث والصنجين ، ولكن كلا من هذه المصادر يتكون اساسا من جسم مهتز يقوم بتوليد الموجات في الهواء .

هل فكرت ولو مرة واحدة اثناء مشاهدتك للتلفزيون أن كل ماتراه وتسمعه قد وصل اليك من محطة الارسال بواسطة موجات ؟ هذه الموجات عبارة عن موجات كهربائية مغناطيسية تتولد في المحطة نتيجة لاهتزاز الشحنات الكهربائية في الهوائى ، وتنتقل هذه الموجات في الهواء لتصل إلى جهاز التلفزيون الذى يستجيب لها ثم يحولها إلى موجات ضوئية وصوتية تنتقل اليك عبر الغرفة .

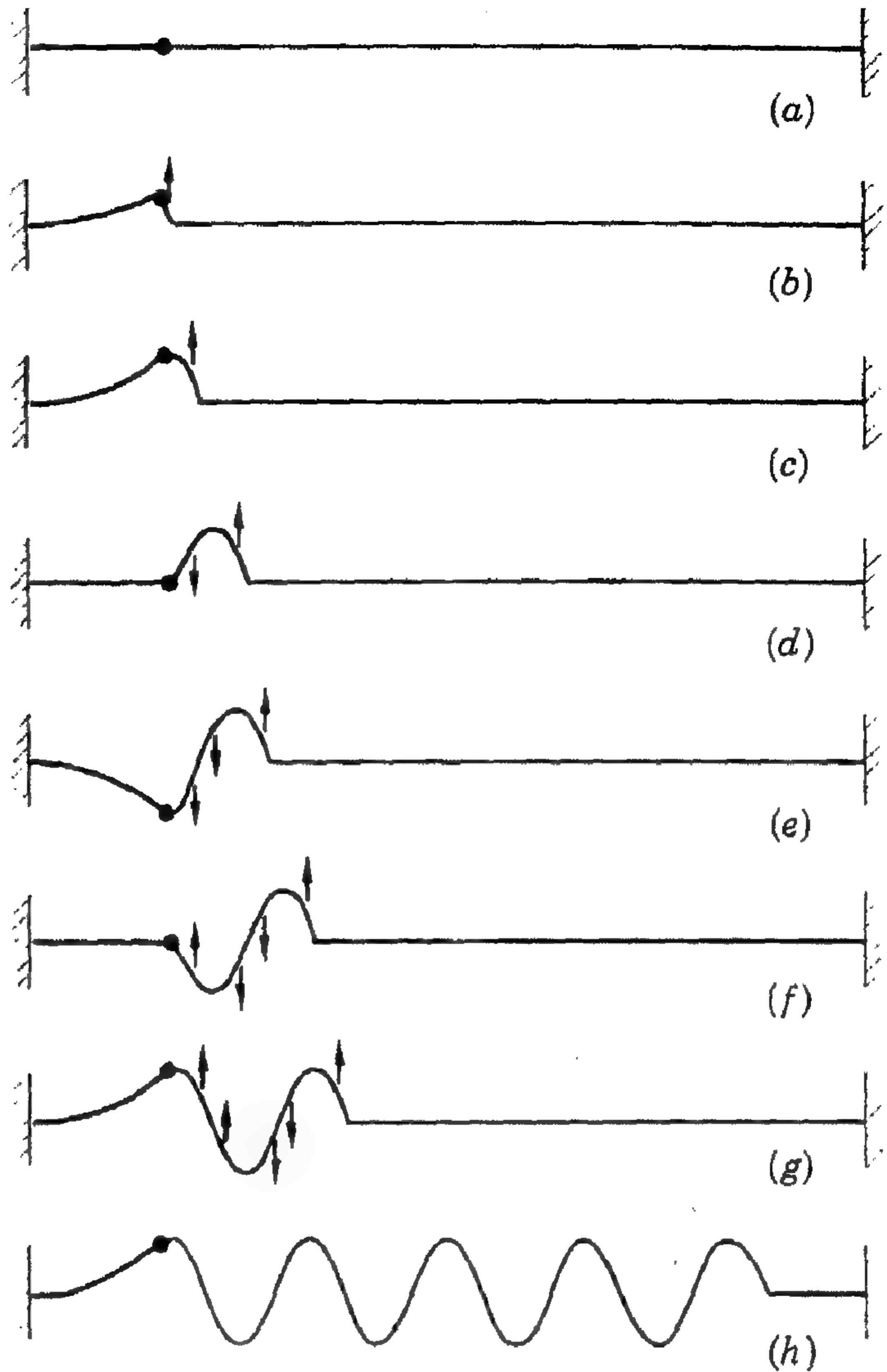
وإذا أصبت بكسر في احدى عظام جسمك فإن من المؤكد تقريبا أن الطبيب سوف يستخدم الاشعة السينية ، وهى نوع آخر من الموجات ، لتحديد طبيعة الكسر . وإذا لم يظهر الكسر في الصورة المأخوذة بالاشعة السينية ، قد يقترح الطبيب علاج عضلاتك المجهدة بنوع آخر من الحركة الموجية ، وهى الحرارة أو الاشعة تحت الحمراء .

وهناك أنواع كثيرة أخرى من الموجات المألوفة لنا ، ومع ذلك فهناك ظواهر موجية أخرى غير ملحوظة . فمثلا ، سوف نرى في الفصل السادس والعشرين أن الخواص الموجية ليست مقصورة على الموجات فقط ، بل تمتد إلى الأجسام المادية مثل كرة البيسبول التى قد تظهر بعض الخواص الموجية .

وفي هذا الفصل سوف نتعرف على القواعد العامة المتعلقة بسلوك الموجات ، وسوف نرى أن جميع الموجات الميكانيكية يمكن تقسيمها إلى نوعين عامين يضم كل منهما عددا كبيرا من الموجات ذات الأشكال المختلفة . وتظن لأهمية الموجات فإن جزءا كبيرا من علم الفيزياء مخصص لدراسة سلوكها .

شكل (١٤ - ١)

يرسل القضيب المهتز موجة
تنتقل في الوتر المرن . وحيث
أن حركة الكرة هي حركة
توافقية بسيطة ، فإن الموجة
التي تنتقل على الوتر هي
موجة جيبية .



١٤ - ٢ الموجات عبر الاوتار : الموجات المستعرضة

لنفرض أننا ربطنا أحد طرفي وتر أو خيط في حائط وربطنا طرفيه الآخر في طرف قضيب من الصلب بحيث كان الوتر مشدودا كما هو مبين في الشكل ١٤ - ١ . فإذا طرق طرف قضيب الصلب المرن من اسفل لأكسابه سرعة إلى أعلى كما هو مبين في الجزء (ب) من الشكل ، فإن طرف القضيب سوف يهتز ذهابا وإيابا ، كما هو موضح في الأجزاء المتتالية من الشكل ١٤ - ١ . ونحن نفترض أن طرف القضيب يتحرك أساسا حركة توافقية بسيطة .

يلاحظ في الجزء ب أن الخيط يندفع إلى أعلى مع طرف القضيب . كما يلاحظ أيضا أن السرعات في مختلف النقاط على الخيط تتخذ اتجاه الاسهم الموضحة . نرى

من هذا أن ذلك الجزء من الخيط القريب من طرف القضيب يقوم بجذب الجزء الأيمن المجاور له إلى أعلى . وعندما يبدأ ذلك الجزء في الاستجابة إلى هذا الجذب فإنه بدوره يجذب الجزء المجاور له إلى أعلى ، وهكذا . ويتتبع اجزاء الشكل من جـ إلى ز ، سنرى أن الاضطراب يتحرك باستمرار إلى اليمين . لنفرض أن السرعة التي يتحرك بها الاضطراب على الوتر هي v ، وسوف نرى مؤخرا في هذا الجزء أن قيمة هذه السرعة تعتمد على كتلة الوتر والشد فيه .

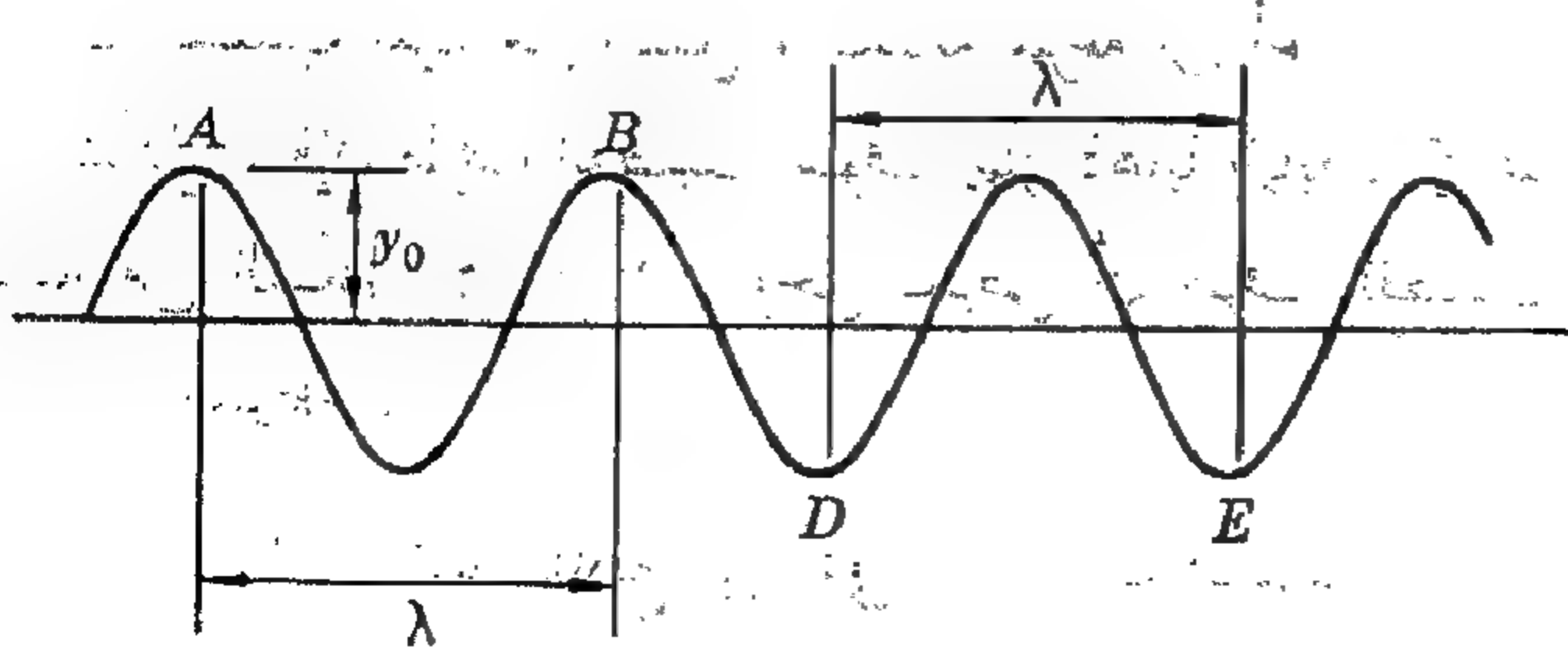
وبينا يستمر الاضطراب الابتدائي في الانتقال على الوتر إلى اليمين للأسباب التي ناقشناها سابقا ، يستمر القضيب في الاهتزاز ويصدر أثناء ذلك اضطرابا يتغير باستمرار ويسير بدوره على الوتر إلى اليمين ، كما هو موضح في الشكل ١٤ - ١ . وحيث أن المصدر يهتز بحركة توافقية بسيطة ، فإن الموجة المتحركة على الوتر ذات شكل جيبي .

وسوف يلاحظ أن الموجة فقط هي التي تتحرك إلى اليمين في الشكل ١٤ - ١ ، بينما تتحرك الاجزاء الصغيرة من الوتر ببساطة إلى أعلى وإلى أسفل . وتسمى مثل هذه الموجة التي تنتقل في اتجاه عمودي على اتجاه حركة الجسيمات بالموجة المستعرضة .

تعريف

وقد يسأل المرء : إذا كانت الجسيمات لا تنتقل في الوتر من اليسار إلى اليمين فماذا يتحرك في اتجاه انتشار الموجة ؟ من الخصائص المميزة للموجات أنها تحمل الطاقة . وفي هذه الحالة المحددة لم يكن للوتر أية طاقة حركة أو طاقة وضع في البداية ، ومع ذلك فإن من الواضح أن طاقة الحركة موجودة في تلك الأجزاء من الموجة التي يتحرك فيها الوتر بسرعة . وهذه الطاقة ، وكذلك طاقة الوضع قد انتقلت من القضيب المهتز إلى الوتر ثم انتقلت فيه من اليسار إلى اليمين . ومن ثم فإن الطاقة تنتقل مع الموجة في اتجاه انتشارها بسرعة تساوي سرعة الموجة v .

يمكن فهم المصطلحات المستخدمة عند الحديث عن الموجات بسهولة بالرجوع إلى الشكل ١٤ - ٢ .



شكل (١٤ - ٢)
سعة الموجة هي y_0 وطولها
الموجي λ .

تسمى النقطتان A و B على الموجة قمتين للموجة ، بينما تسمى النقطتان D و E قرايين . والدورة الكاملة الواحدة ، أى ذلك الجزء من الموجة الذى تولده دورة كاملة واحدة من المصدر المهتز ، هى المسافة بين قمتين متتاليتين ، أى من A إلى B ، أو المسافة بين قرايين متتاليتين ، أى من D إلى E . وتسمى المسافة الأفقية بين أى قمتين متتاليتين أو أى قرايين متتاليتين بالطول الموجى للموجة ويمثل بالحرف اليونانى لامدا (λ) . وبالطبع v_0 هى سعة الموجة .

هناك علاقة هامة بين الطول الموجى λ وسرعة الموجة v والتردد f لأى موجة ، وتنطبق هذه العلاقة على جميع الموجات ، وسوف نستعين بالشكل ١٤ - ٣ لايجاد هذه العلاقة . لاحظ أن الموجات تنتقل على الوتر بسرعة قدرها v بينما يستمر المصدر فى إصدار موجة اضافية . ويحتاج المصدر لزمن قدره τ وهو الزمن الدورى للاهتزاز ، لكى يرسل المصدر طولاً موجياً كاملاً على الوتر . وخلال ذلك الزمن تكون الموجات قد تحركت مسافة قدرها λ . إذن ، معادلة الحركة $x = vt$ تتحول فى هذه الحالة إلى الصورة :

$$\lambda = v\tau$$

بالتعويض عن τ بالكمية $1/f$ فى المعادلة السابقة نجد أن :

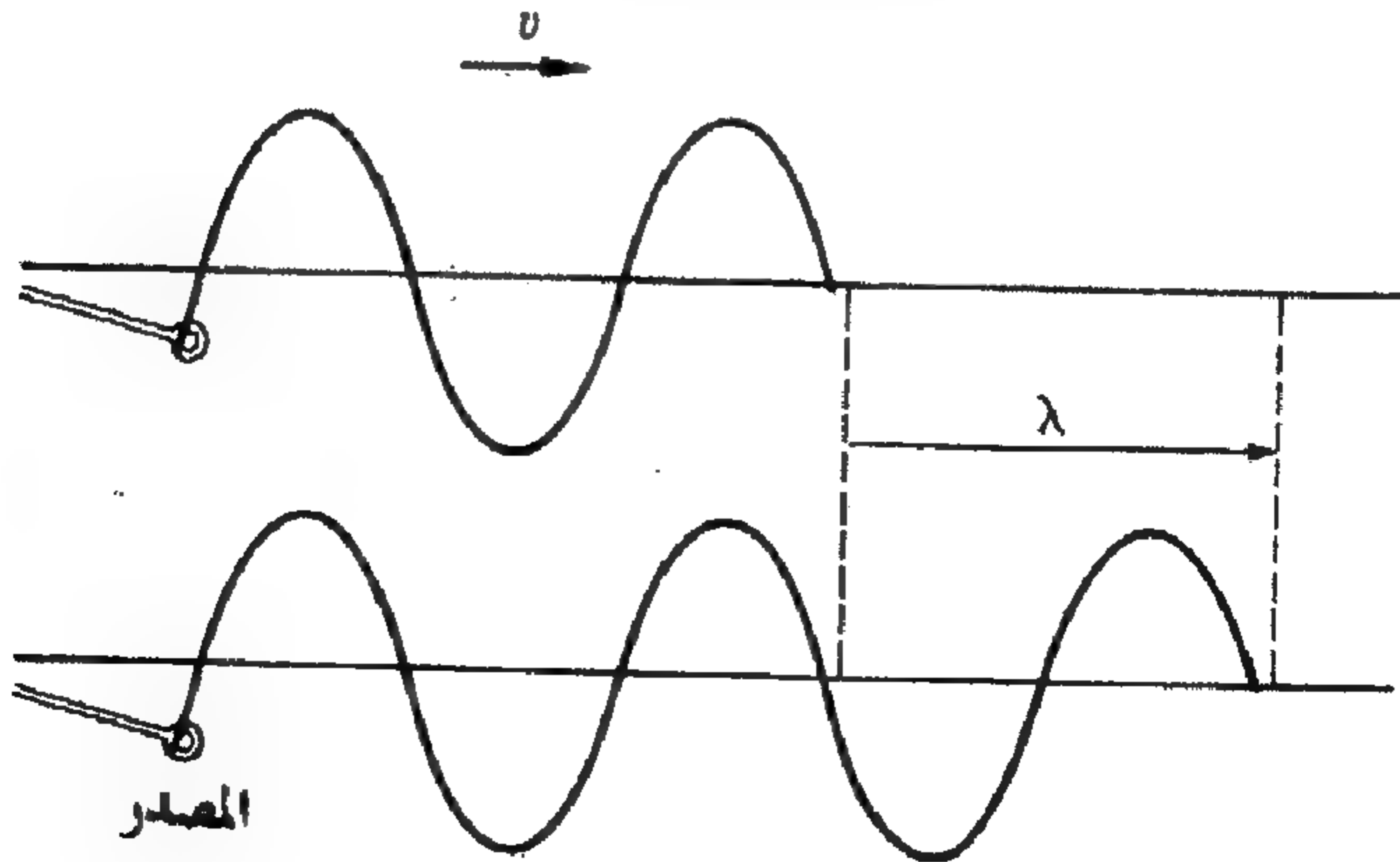
$$\lambda = \frac{v}{f}$$

علاقة
اساسية
للموجات

(١٤ - ١)

وهذه العلاقة الهامة جداً صحيحة لجميع الموجات ، وسوف نستخدمها كثيراً فيما بعد .

تعطى سرعة الموجة على الوتر بعلاقة بسيطة إلى حد كبير . وسوف نذكر هذه العلاقة هنا بدون اثبات . إذا كان T هو الشد فى الوتر وكانت m كتلة جزء من الوتر طوله L فإن سرعة الموجة على الوتر تعطى بالعلاقة :



شكل (١٤ - ٣)

بينما يصدر المصدر موجة كاملة تكون الموجة قد تحركت مسافة قدرها λ على الوتر . إذن ، تقطع الموجة مسافة قدرها λ فى خلال الزمن τ

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}}$$

(١٤ - ٢)

مثال توضيحي ١٤ - ١ : وتر جيتار كتلته 2.0 g وطوله 60 cm . ماهو الشد اللازم للوتر لكي تكون سرعة الموجة عليه 300 m/s ؟

طريقة الحل . بالتعويض في المعادلة (١٤ - ٢) عن $v = 300 \text{ m/s}$ ، $L = 0.6 \text{ m}$ ، $m = 0.0020 \text{ kg}$ ، نجد أن $T = 300 \text{ N}$. لاحظ أن هذا الشد كبير جدا في الواقع ، إذ أنه يكافئ وزن كتلة قدرها 30 kg تقريبا معلقة في الوتر .

١٤ - ٣ انعكاس الموجة

لم نتكلم حتى الآن عما يحدث للموجة عند اصطدامها بالحائط الصلب الموجود على اليمين . وحيث ان الموجة عبارة عن طاقة متحركة إلى اليمين ، فإنها أما أن تمتص بواسطة الحائط ، أو تنعكس إلى الخلف . وعمليا سوف تمتص بعض الطاقة بواسطة الحائط . ومع ذلك ، فإن الجزء الأكبر من الطاقة سوف ينعكس إذا كان الحائط صلبا جدا (أو إذا كان الطرف الأيمن للوتر حرا تماما*) . بناء على ذلك سوف تتحرك موجة منعكسة على الوتر إلى اليسار أثناء حركة الموجة الأصلية إلى اليمين . وللتبسيط سنفترض عدم فقدان أية طاقة عند الانعكاس .

لدراسة هذه الظاهرة اعتبر قمة موجة واحدة تنتقل على الوتر ، كما هو مبين في الشكل ١٤ - ٤ أ . عندما تصل هذه الموجة إلى الحائط فإنها لن تستطيع جذب الحائط إلى أعلى بنفس الطريقة التي تجذب بها الموجة جزءا آخر من الوتر إلى أعلى إذا كان موجودا . وحيث أن الحائط لا « يستسلم » فإن القوة في هذه النقطة ستكون عندئذ أكبر منها في حالة ما إذا لم ينته الوتر عند هذه النقطة . لذلك فإن الحائط سوف يؤثر على الوتر يجذبه إلى أسفل . وهذا الجذب يؤدي بالتالي إلى تسارع الوتر إلى أسفل بحيث تسبب كمية تحركه انخفاضه تحت الخط الصفرى . نتيجة لذلك تنقلب النبضة رأسا على عقب عند اصطدامها بالحائط ، ولذلك فإن الموجة المنعكسة تبدو كما هو مبين في الجزء ب من الشكل ١٤ - ٤ . وإذا كان الوتر حرا تماما في أن يتحرك إلى أعلى وإلى أسفل عند هذا الطرف ، فإن الموجة لم تكن لتنعكس ، بالرغم من أنها سوف تنعكس أيضا (لأن طاقة الموجة لا يمكن أن تختفي ببساطة عند هذا الطرف من الوتر !) . تلخيصا لذلك يمكننا أن نقول أن



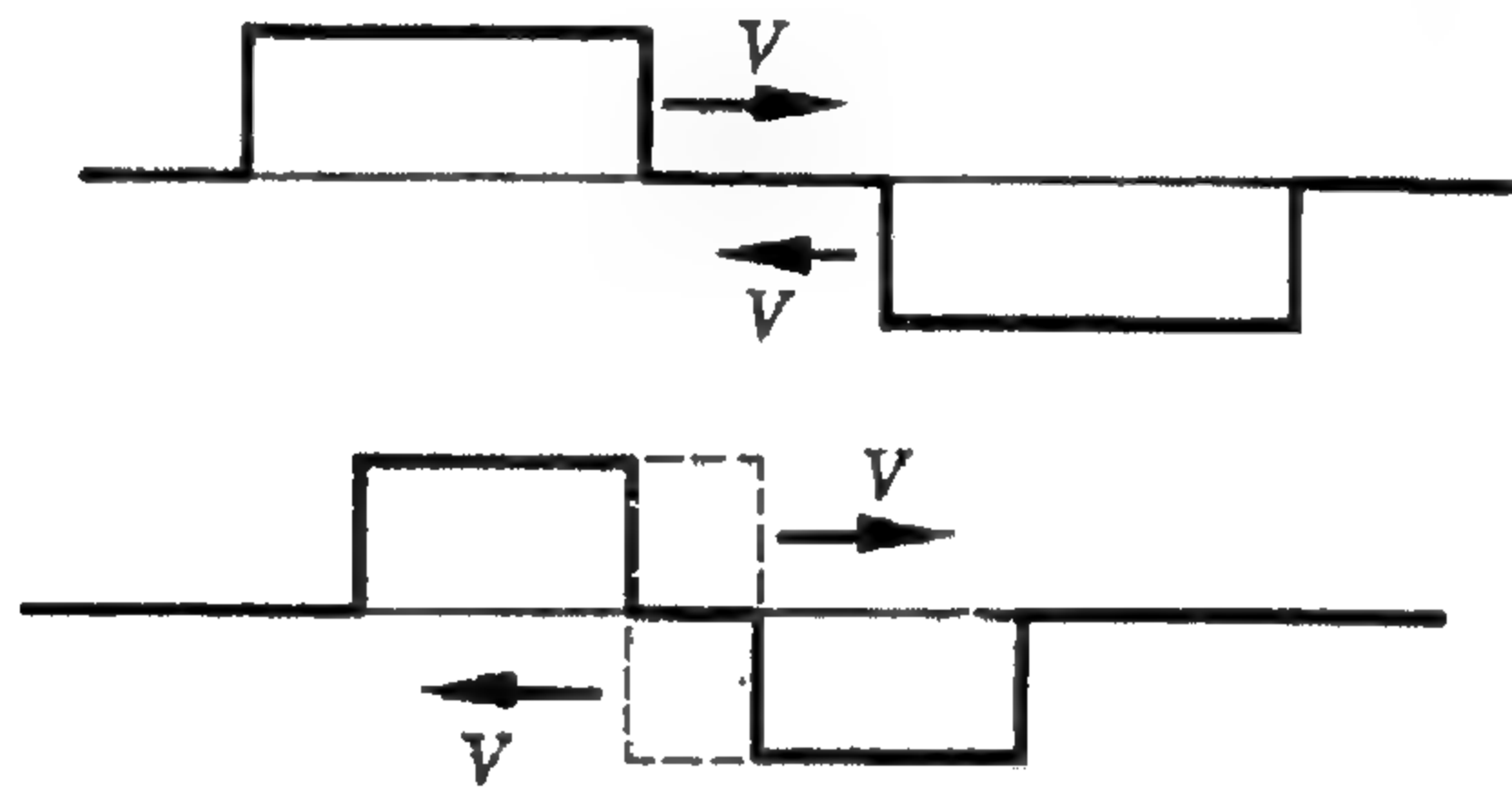
شكل (١٤ - ٤)

تنقلب النبضة الموجية المتحركة على وتر عند انعكاسها من النهاية الثابتة .

* لا يمكن أن يبدل أى شغل عند النهاية الثابتة ، لأن المسافة المقطوعة في اتجاه القوة المؤثرة تساوى صفرا . لماذا لا يحدث فقدان للطاقة ، أى لماذا لا يبدل أى شغل ، عند الطرف الحر تماما ؟

النبضة الموجية تنقلب بالانعكاس عند النهاية الثابتة . ولكنها تنعكس دون انقلاب عند النهاية الحرة .

لنعتبر الآن ما يحدث عند التقاء نبضة موجية منعكسة تتحرك على وتر إلى الخلف مع نبضة ثانية متحركة على نفس الوتر إلى الأمام . لنفرض أن نبضتين مستطيلتين متحركتين في اتجاهين متعاكسين قد التقيتا في موضع معين على الوتر كما هو مبين في الشكل ١٤ - ٥ ، حيث تمثل الموجتان الأصليتان بالخطوط المتقطعة في منطقة التراكب . وقد وجد بالخبرة أن إزاحة الوتر في هذه المنطقة تمثل بالخط المستمر . ذلك أن الإزاحة المحصلة للوتر هي المجموع الاتجاهي للإزاحتين المنفصلتين . وهذا صحيح لجميع الأنظمة الموجية طالما كانت الإزاحة دالة خطية للقوة التي تسببها . وعندئذ يقال أن مبدأ التراكب ينطبق على هاتين الموجتين . ويلاحظ أن جميع الموجات التي سنتعامل معها في هذا الكتاب تتبع مبدأ التراكب :



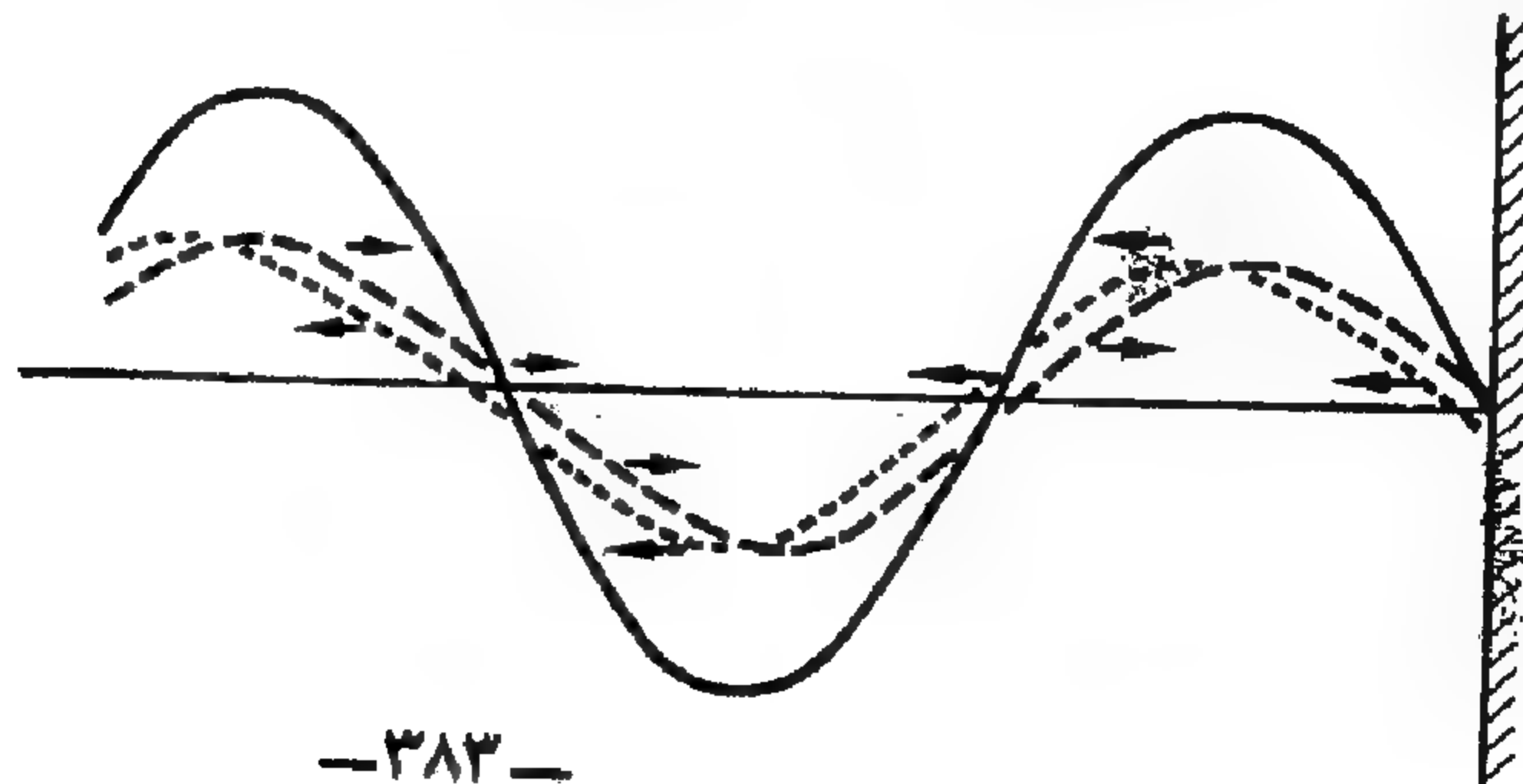
شكل (١٤ - ٥)
طبقا لمبدأ التراكب ، تجمع
الموجتان اللتان تنتقلان على
نفس الوتر بالطريقة المينة عند
التقاءهما سويا

مبدأ التراكب

إذا وقعت نقطة تحت تأثير موجتين في نفس الوقت فإن إزاحتها تساوى المجموع الجبرى للاضطرايين المنفردين .

نحن الآن مستعدون لكي نرى ما يحدث عند انعكاس موجة جيبية متحركة على وتر ، وسيكون لزاما عليك هنا أن تستخدم خيالك إلى حد ما لأننا سوف نرسم صورتى موجتين على نفس الوتر . وللحصول على السلوك الحقيقى للوتر يجب علينا أن نجتمع هاتين الموجتين اللتين تمثلان إزاحتى جزئيات الوتر .

تمثل الموجتان اللتان تسيران على الوتر إلى اليمين وإلى اليسار في الشكل ١٤ - ٦ بالمنحنيين المنقطين . ويمكن الحصول على الإزاحة المحصلة للوتر بجمع هذين المنحنيين



شكل (١٤ - ٦)
تجمع الموجتان الساقطة
والمنعكسة سويا لينتجا موجة
واحدة ذات عقدة عند
الطرف الثابت .

المنقطين ، والنتيجة موضحة بالمنحنى المستمر في الشكل . ولكي نختبر صحة عملية الجمع هذه يمكنك أن تقوم بجمع المنحنيين في بعض النقط . لاحظ أن الموجتين تلاشي كل منهما الأخرى تماما عند الحائط ، وعليه فإن إزاحة الوتر في هذه النقطة تساوى صفرا . بالإضافة إلى ذلك يمكنك أن ترى بسهولة أن الموجتين تستمران في الحركة بمرور الوقت وأنهما سوف تكونان متوائمتين دائما بحيث تلاشي كل منهما الأخرى عند الحائط . ويجب أن يكون هذا صحيحا بالطبع لأن الوتر يتبرأ أن ساكنا عند هذه النقطة .

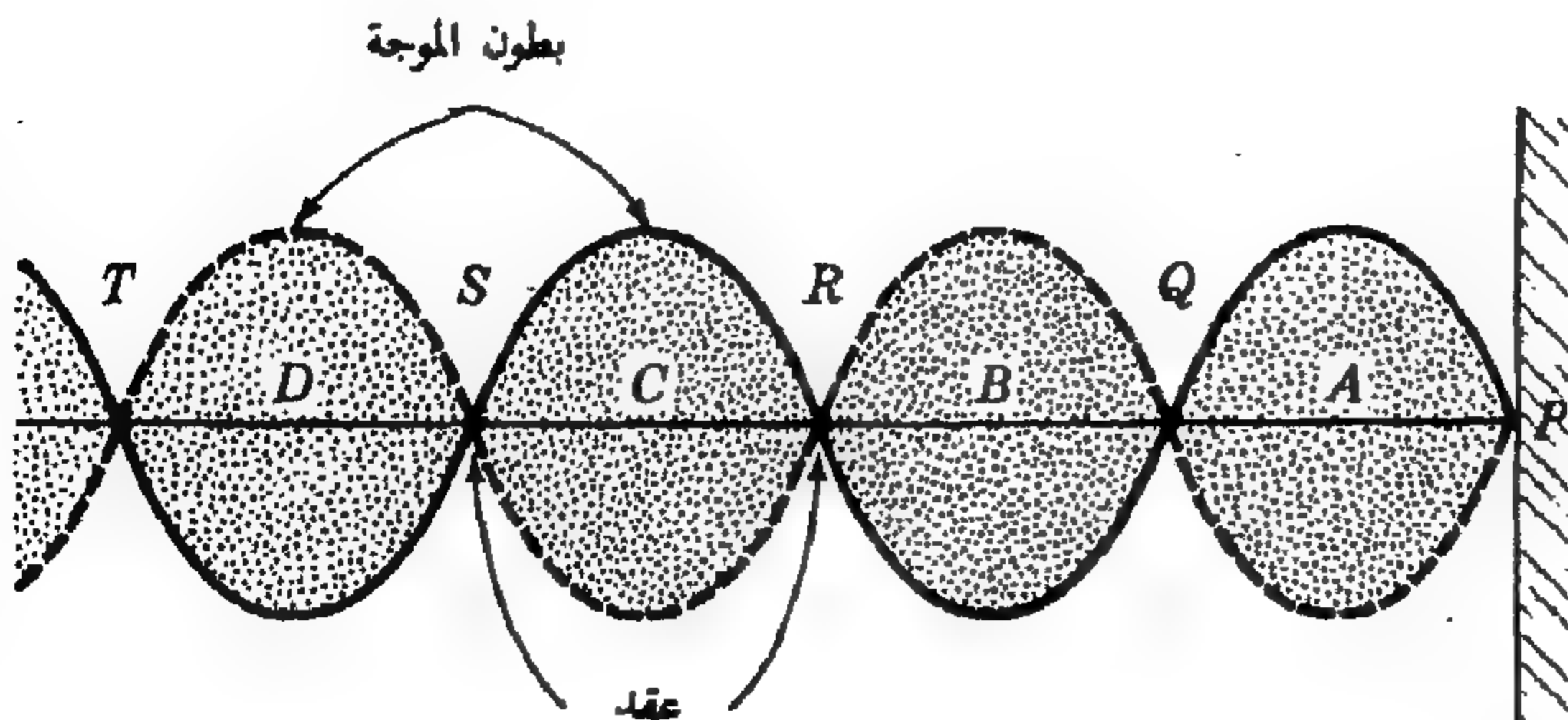
انظر الآن إلى أى نقطة أخرى تلاشي فيه كل من الموجتين الأخرى في الشكل ١٤ - ٦ . عندئذ سوف تلاحظ أنه عندما تتحرك كل من الموجتين في اتجاه فإنهما تلاشيان كل منهما الأخرى في نفس هذه النقط . ومن ثم فإن لدينا نتيجة هامة جدا ، وهي أن الموجتين الساقطة والمنعكسة تتداخلان بحيث تنعدم الحركة في نقطة معينة على الوتر طول الوقت . وتسمى نقط انعدام الحركة بالعقد .

تعريف

من الضروري أن نلاحظ ما يحدث في تلك النقط على الوتر التي تقع في منتصف المسافة بين كل عقدتين متتاليتين . وفي الحقيقة فإن الإزاحة عند هذه النقط تكون أكبر مما يمكن كما هو موضح في الشكل ١٤ - ٦ . وسوف نترك لك كتمرين أن تثبت أنه مع استمرار الموجتين في الحركة تتذبذب هذه النقط ذهابا وإيابا بين إزاحة موجبة كبيرة جدا وإزاحة سالبة كبيرة جدا . وهذا موضح في الشكل (١٤ - ٧) . وتسمى نقط الحركة العظمى ببطون الموجة .

تعريف

كما هو موضح في الشكل ١٤ - ٧ ، يتذبذب الوتر ذهابا وإيابا بين الموضعين المبيينين . وتمثل العقد T, S, R, Q, P تلك النقط التي تظل ساكنة ، ولا تحدث أى حركة في الوتر عند هذه النقط . ومن ناحية أخرى ، تمثل النقط D, C, B, A بطون الموجة وهي النقط التي يتذبذب فيها الوتر ذهابا وإيابا بسعة كبيرة .



شكل (١٤ - ٧)

يهتز الوتر ذهابا وإيابا بين الحدين المبيينين ، ولا تحدث أى حركة عند العقد ، بينما تكون الحركة في نهايتها العظمى عند بطون الموجة .

المسافة بين عقدتين
 $\lambda/2 =$

ومقارنة الشكل ١٤ - ٧ بالشكل ١٤ - ٢ سنرى أن المسافة بين بطنين متجاورتين هي $\lambda/2$ ، وأيضا المسافة بين عقدتين متجاورتين هي $\lambda/2$.

١٤ - ٤ الرنين

رأينا في الفصل السابق أن الجسم المهتز يمكن أن يهتز بشدة كبيرة إذا كانت القوة المسببة للاهتزاز ذات تردد مناسب . وإذا كانت هذه القوة تدفع الجسم بتردد يساوى التردد الطبيعي للاهتزاز ، فإن القوة ستكون في حالة رنين مع الجسم ، وعندئذ ستكون سعة الاهتزاز كبيرة جدا . لنستعرض الآن ما يحدث لتكون القوة في حالة رنين مع النظام المهتز .

كمثال شائع ، نعلم أنه ليس من الضروري حقيقة أن ندفع طفلا في أرجوحة بقوة كبيرة لكي تصل الأرجوحة إلى ارتفاع كبير . بل يكفي أن تدفع الأرجوحة دفعات دورية صغيرة عندما تكون الأرجوحة في الموضع المناسب ، وهذا يؤدي في نهاية الأمر إلى زيادة سعة الذبذبة . ويمكننا أن نتبين سبب صحة ذلك باستخدام المفاهيم التي تعلمناها عن الشغل . عندما يدفع الشخص الأرجوحة في اتجاه حركتها فإنه يبذل شغلا على الأرجوحة . وتسبب هذه الطاقة ارتفاع الطفل بعض الشيء في الذبذبة التالية . وتكرر هذه العملية عدة مرات يزداد ارتفاع الأرجوحة تباعا كنتيجة للطاقة التي يزود بها النظام . وتتوقف زيادة سعة الذبذبة عندما تتساوى الطاقة التي يبذلها الشخص على النظام تماما مع فواقد طاقة الاحتكاك أثناء ذبذبة واحدة كاملة .

وبنفس هذه الطريقة يمكن أن تزداد سعة ذبذبة أى نظام مهتز تحت تأثير قوة حافزة دورية . لاحظ ، مع ذلك ، أن القوة الحافزة يجب أن تستخدم في اللحظة المناسبة لكي يزود النظام بالطاقة . (إذا كانت القوة الحافزة تؤثر على النظام أثناء حركته في الاتجاه المعاكس ، فإن النظام هو الذى سوف يبذل شغلا على الآلية الحافزة ، ولذلك فإن النظام سوف يفقد الطاقة بدلا من أن يكتسبها) . وعندما تكون القوة الحافزة متفقة في الخطوة مع النظام المهتز بحيث تصبح السعة كبيرة يقال في هذه الحالة أن القوة الحافزة والنظام المهتز في حالة رنين . ولكي يحدث الرنين يجب أن يتحقق شرطان أساسيان . أولا ، يجب أن يكون تردد القوة الحافزة مساويا لتردد الاهتزاز للنظام . ثانيا ، يجب أن تكون القوة الحافزة متفقة في الطور مع الاهتزاز . أى أن القوة يجب أن تكون متفقة في الخطوة مع الاهتزاز .

يمكن أن نذكر أمثلة كثيرة للرنين . فأرجوحة الطفل هي واحد من هذه الأمثلة . كذلك فإن كثيرا من الساعات ذات البندول تدار بواسطة جهاز يعمل في حالة رنين

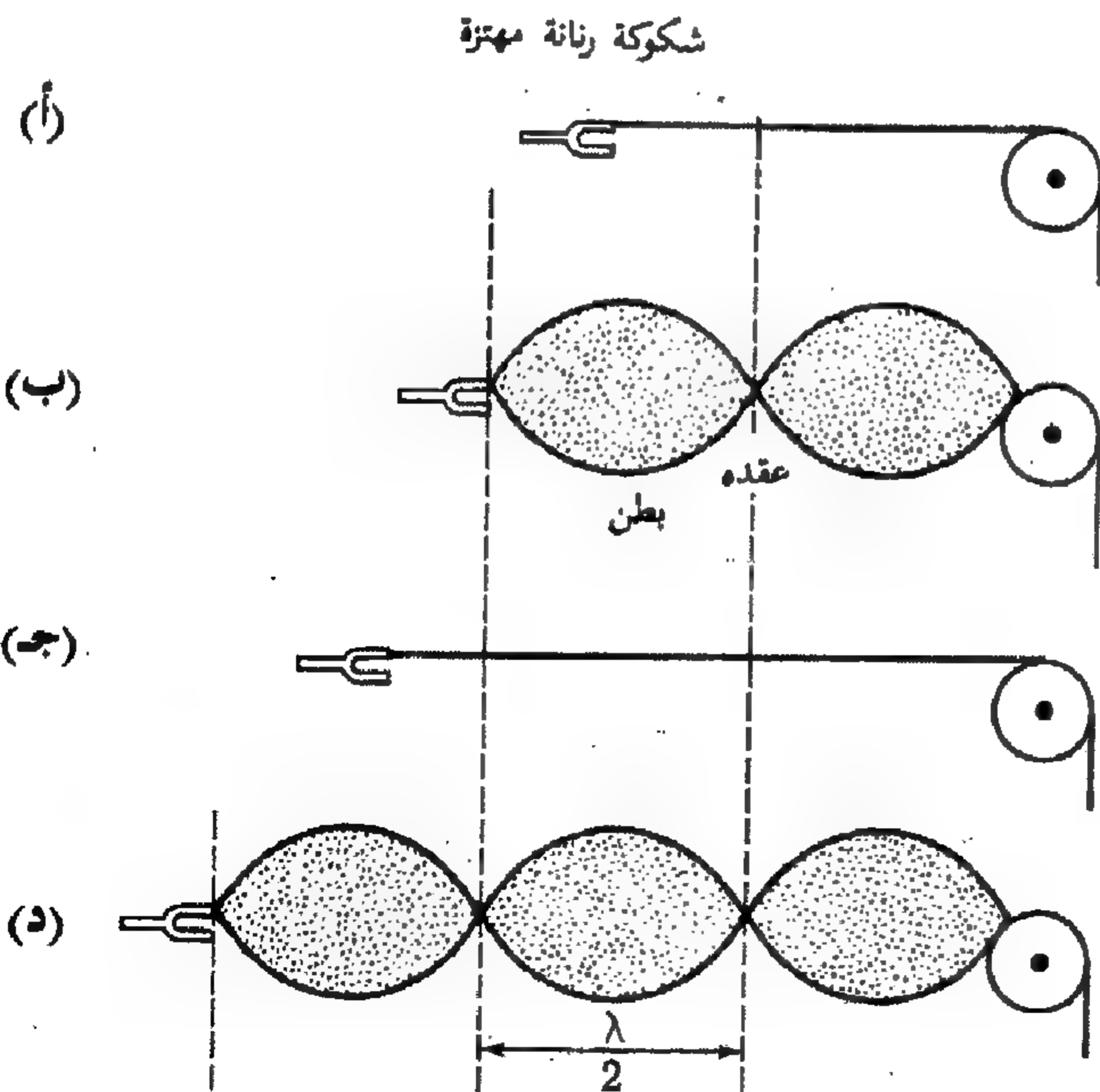
مع البندول . وأيضاً تستخدم ظاهرة الرنين في جميع الآلات الموسيقية لإنتاج الصوت المسموع ، وسوف نناقش هذا المثال بالتفصيل فيما بعد .

وليس الرنين مستحباً في جميع الحالات . فمن المعروف مثلاً أن خشخشة السيارة تصبح مزعجة جداً عند سرعة معينة ذلك أن مصدر الخشخشة ، وهو جزء معين من جسم السيارة ، يصبح في حالة رنين مع الحركة الاهتزازية للسيارة عند هذه السرعة المعينة . ويصبح هذا النوع من الاضطراب خطيراً جداً في السيارات التي تكون عجلاتها غير متزنة . ذلك أن الارتطام المكتوم للعجلة بالطريق يتغير تردده مع سرعة السيارة . وليس من المستغرب إذن أن تبدأ مختلف أجزاء السيارة في الاهتزاز بشدة عند الوصول إلى تردد الرنين .

في الجزء التالي سنقوم بمناقشة الحركات الرنينية للوتر المهتز . وسوف نرى أن حالة الرنين مع القوى الحافزة تتحقق عند أكثر من تردد واحد . وبالرغم من أن الحسابات التي سوف تجربها بالنسبة للوتر أمثلة بسيطة جداً ، فإننا سوف نرى أن الأنظمة المهتزة المعقدة ذات خصائص رنينية مشابهة بوجه عام .

١٤ - ٥ الحركة الرنينية لوتر : الموجات المستقرة (أو الواقفة)

لنعتبر ما يحدث عندما يقوم مهتز بإرسال الموجات تنتشر على وتر حقيقي كما هو مبين في الشكل ١٤ - ٨ ، وإذا أجرينا التجربة المبينة فإننا سوف نحصل على نتائج هامة . واضح من الشكل أن أحد طرفي الوتر مثبت في المهتز ، بينما يستقر الطرف



شكل (١٤ - ٨)
ماهي الأطوال الأخرى التي
يحدث رنين الوتر عندها ؟

الآخر على بكرة كبيرة تحت تأثير قوة شد ثابتة . ويمكن زيادة طول الوتر بتحريك الشوكة الرنانة إلى اليسار كما هو مبين في الاجزاء المتتالية من الشكل .

يظل الوتر عديم الحركة تقريبا عند معظم أطواله بالرغم من اهتزاز الشوكة الرنانة ، ويفسر ذلك كالتالى . يرسل المهتز نبضات موجية صغيرة تتحرك على الوتر لتصل إلى البكرة حيث تنعكس للخلف . وعندما تتحرك النبضة الموجية تجاه البكرة فإنها تشبه أرجوحة الطفل عندما تتحرك متباعدة عن الشخص الذى يدفعها ؛ وكأرجوحة الطفل تنعكس النبضة ثم تعود إلى الدافع ، وهو المهتز فى هذه الحالة . وعادة لا يكون المهتز متحركا بالطريقة المضبوطة لكى يعكس النبضة مرة أخرى ويزودها بالتالى بالطاقة . وكما يدفع الشخص الأرجوحة بطريقة غير صحيحة ، سيؤدى هذا الدفع إلى إضعاف الحركة بدلا من تقويتها . ولهذا السبب فإن النبضات الصغيرة الصادرة من المهتز والمتحركة على الوتر تضعف عادة ، ونتيجة لذلك يظل الوتر ساكناً تقريباً كما هو موضح فى الجزء أ .

الموجة
المستقرة
أو الواقفة

ومع ذلك ، فعند زيادة طول الوتر يبطئ ستشاهد نتيجة غريبة . ذلك أن الوتر سوف يبدأ فى الاهتزاز بشدة عند طول محدد تماما ، كما هو مبين فى الجزء ب . وفى هذه الحالة يهتز الوتر ذهابا وإيابا بين الحدين المبيين . وتنعدم الحركة تماما فى نقط معينة على الوتر ، وهذه هى العقد . وتصل شدة الاهتزاز إلى أقصاها فى نقط محددة أخرى ، وهذه هى البطون . ويسمى النمط المكون من هذه العقد والبطون بالموجة المستقرة على الوتر .

من السهل أن نفهم ماذا يحدث ويؤدى إلى تكوين الموجة المستقرة ، ففى هذه الحالة الخاصة جدا تصل الموجة المنعكسة من البكرة إلى المهتز فى الوقت المناسب تماما لتقويتها بواسطة المهتز . وفى لحظة انعكاس النبضة من المهتز فإن كليهما يكونان متفقين فى الخطوة (أو الطور) وهذا يؤدى إلى تقوية النبضة نتيجة لذلك ليستمر المهتز فى إضافة الطاقة إلى النبضات أثناء تحركها ذهابا وإيابا على الوتر ، ولذلك فإن النبضات تصبح كبيرة جدا .

ولكننا رأينا سابقا فى الجزء ١٤ - ٣ أن النبضات المتحركة على الوتر إلى اليمين وإلى اليسار تتراكب مكونة عقدا وبطونا . نتيجة لذلك يهتز الوتر فى نمط محدد من العقد والبطون . بالإضافة إلى ذلك ، حيث أن مجموع هذه النبضات كبير جدا ، فإن هذا النمط كبير ويمكن رؤيته بسهولة . من هذا نرى أن الموجة المستقرة الكبيرة هى نتيجة لوجود المهتز فى حالة رنين مع النبضات الموجية على الوتر .

والآن ، إذا ازداد طول الوتر المبين في الشكل ١٤ - ٨ أكثر من ذلك سوف تصل الموجات المنعكسة من البكرة إلى المهتز متأخرة قليلا عما قبل . وعندئذ لن تكون النبضات متفقة في الطور مع المهتز ، ولهذا لن يحدث الرنين . وعليه فإن الوتر سيصبح ساكنا تقريبا كما هو مبين في الجزء جـ من الشكل .

ولكن عندما تستمر في زيادة طول الوتر سوف يحدث الرنين فجأة عند طول معين كما هو مبين في الجزء د . ومرة ثانية ستصبح النبضات متفقة في الطور مع المهتز عند وصولها إليه ، ولذلك تتكون على الوتر نبضات كبيرة ، ونتيجة لذلك تتكون على الوتر موجة مستقرة مرئية . وكما نرى ، يحدث رنين الوتر مع المهتز تحت شروط خاصة جدا . لتبين الآن ماهي هذه الشروط بطريقة كمية .

نذكر مما سبق أن المسافة بين عقدتين متاليتين هي $\lambda/2$ ، وبفحص الشكل ١٤ - ٨ سنرى أن المهتز قريب جدا من موضع عقدة لأنه لا يستطيع أن يتحرك كثيرا . إذن يمثل طرفا الوتر المهتز في حالة رنين عقدتين . وعليه فإن الرنين يمكن أن يحدث فقط إذا كان طوله $\lambda/2$ أو $2(\lambda/2)$ أو $3(\lambda/2)$ وهكذا . وفي الحقيقة يمكننا أن نقول عامة أن رنين الوتر المثبت جيدا من طرفيه يحدث فقط إذا كان طوله مساويا لعدد صحيح من أنصاف الطول الموجي . فمثلا ، في الأجزاء أ ، ب ، ج ، د من الشكل ١٤ - ٩ طول الوتر L يساوي $\lambda/2, 2(\lambda/2), 3(\lambda/2), 4(\lambda/2)$ على الترتيب . إذن ، يحدث الرنين عموما إذا كان :

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

(١٤ - ٣)

حيث : $n = 1, 2, 3, \dots$

وحيث أن الطول الموجي يرتبط بالتردد طبقا للمعادلة (١٤ - ١) ، يمكننا أن نرى مباشرة أن رنين الوتر المثبت من طرفيه يحدث فقط عند ترددات خاصة جدا . وبالأصطلاحات الفنية الحديثة يقال أن الترددات الرنينية للوتر مكماة ، بمعنى وجود ترددات رنينية خاصة فقط .

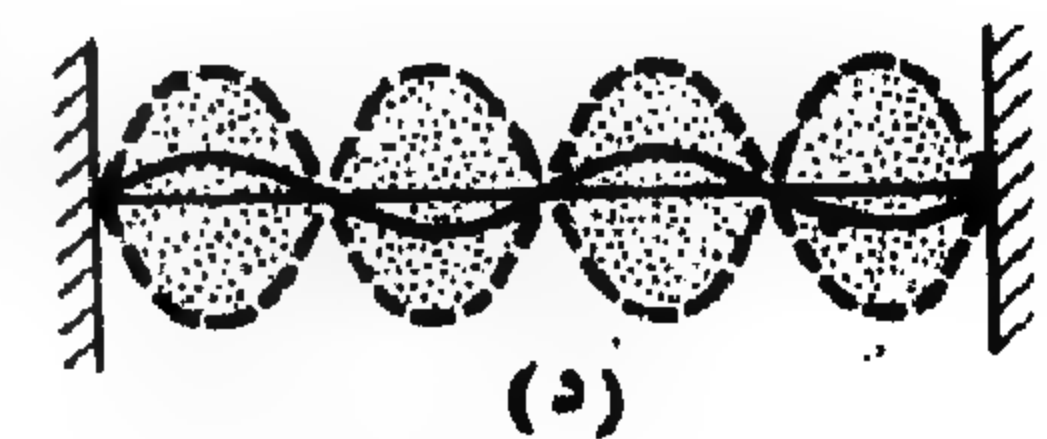
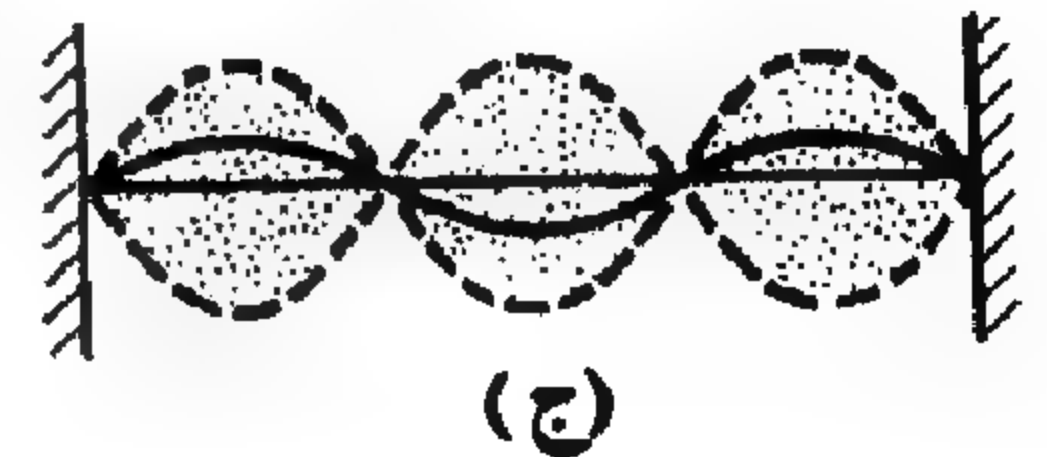
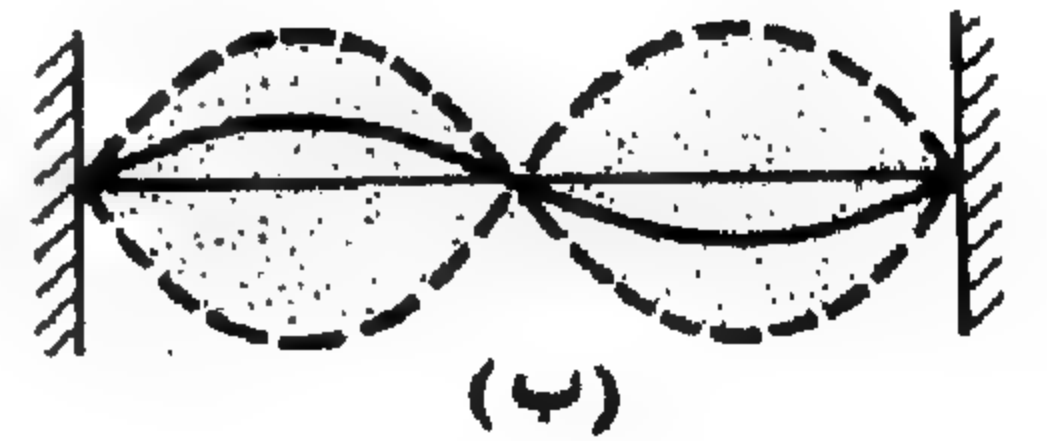
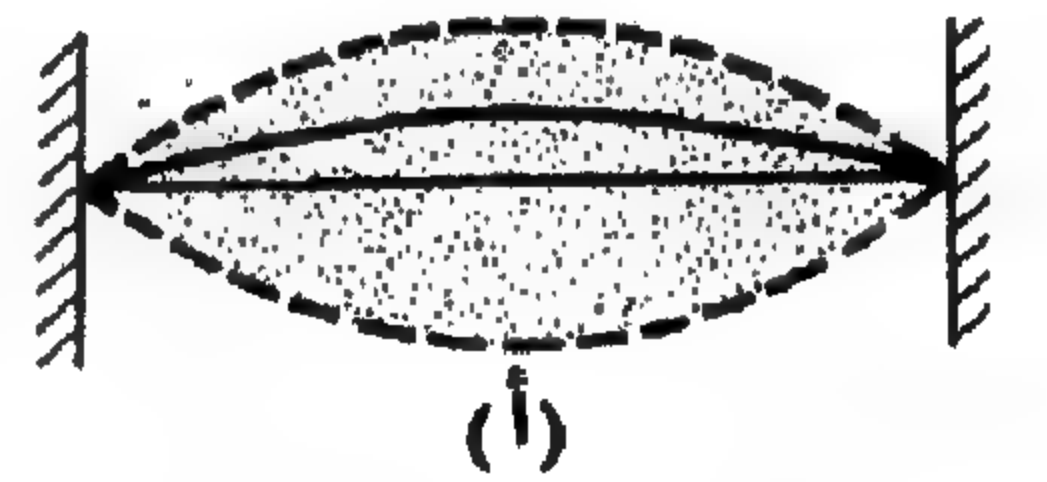
مثال توضيحي ١٤ - ٢ : وتر طوله 6.0 m وسرعة الموجات عليه 24 m/s . ماهي الترددات الحافزة التي يحدث عندها رنين هذا الوتر ؟ ارسم صورة للوتر لكل تردد رنيني .

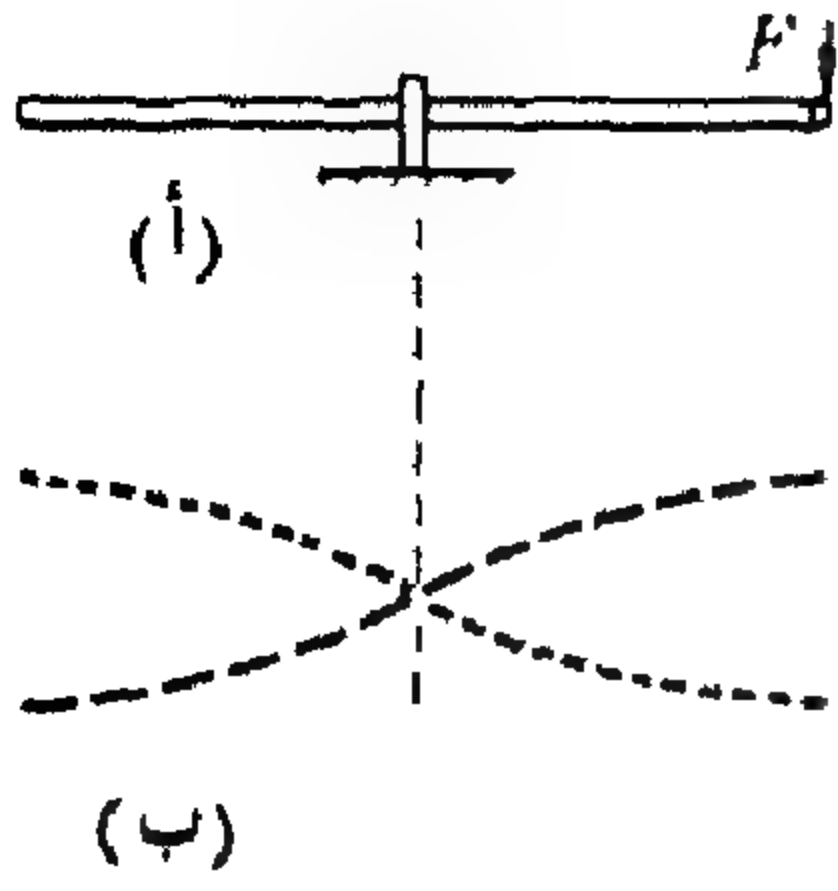
طريقة الحل . تعطى الأطوال الموجية الرنينية بالمعادلة (١٤ - ٣) . إذن :

شروط الرنين

شكل (١٤ - ٩)

في الأنماط الرنينية لاهتزاز وتر مثبت من طرفيه يجب أن تكون عقدتان عند طرفي الوتر . وهذه هي أبسط أربع موجات مستقرة ممكنة .





$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad \lambda_1 = 12 \text{ m} \quad \lambda_2 = 6 \text{ m}$$

$$\lambda_3 = 4 \text{ m} \quad \lambda_n = \frac{12}{n} \text{ m}$$

وباستخدام المعادلة (١٤ - ١) لإيجاد الترددات الرنينية ، نجد أن :

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad f_1 = \frac{24}{12} = 2 \text{ Hz} \quad f_2 = \frac{24}{6} = 4 \text{ Hz}$$

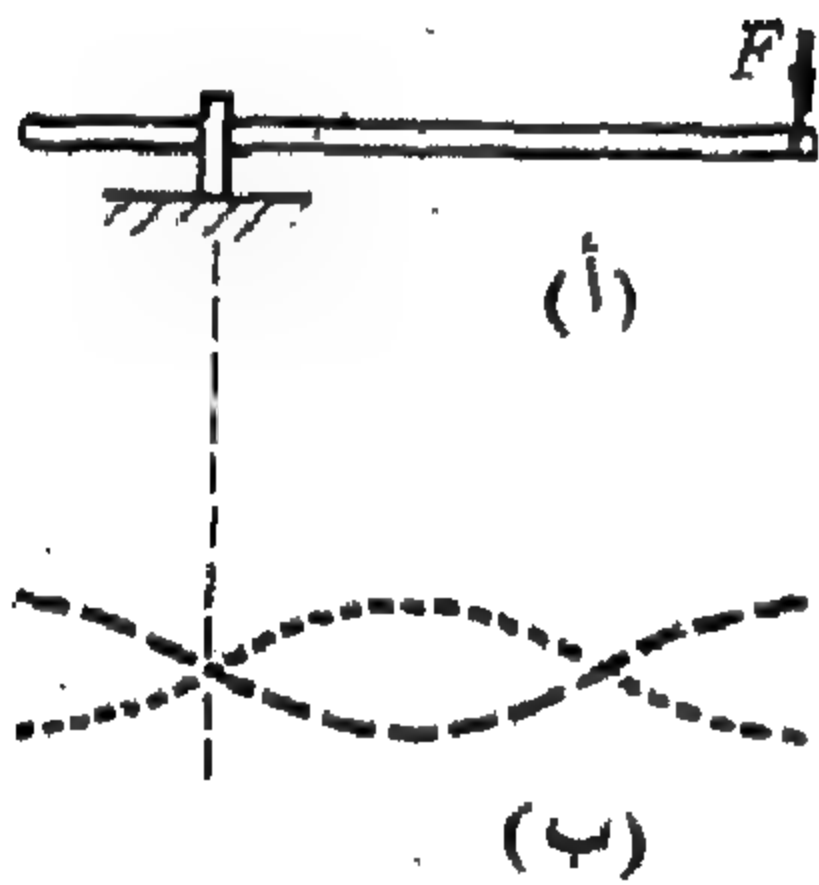
$$f_3 = \frac{24}{4} = 6 \text{ Hz} \quad f_n = \frac{24}{12/n} = 2n \text{ Hz}$$

شكل (١٤ - ١٠) .
تكون الموجة المستقرة
المستعرضة عند طرق
القضيب كما هو مبين .

وتظهر أنماط اهتزاز الوتر ، أى الموجات المستقرة المختلفة ، كما فى الاجزاء أ ، ب ، ج ، د من الشكل (١٤ - ٩) عندما يكون التردد f_1, f_2, f_3 على الترتيب .

١٤ - ٦ موجات مستعرضة أخرى

لقد استنفدنا وقتا كبيرا فى دراسة الموجات المنتشرة على الأوتار نظرا لأن المبادئ التى تنطبق عليها تنطبق كذلك على كثير من الأنظمة المهتزة الأخرى . فمثلا إذا ثبت قضيب معدنى فى مركزه ثم طرق على احدى نهايتيه ، كما هو مبين فى الشكل ١٤ - ١٠ ، فإن القضيب سوف يهتز ، ويوضح الجزء ب من الشكل ١٤ - ١٠ نمط اهتزاز القضيب فى هذه الحالة .



وينجب أن يكون مركز القضيب عقدة موجية لأنه مثبت بشدة ولا يمكنه أن يتحرك . وحيث أن طرفي القضيب غير مثبتين ، فلا بد أن نتوقع وجود بطن بالقرب من كل منهما وإذا فرضنا أن بطن الموجة ينطبق تماما على كل من طرفي القضيب ، فإن طول القضيب سيساوى نصف الطول الموجى ، وذلك لأن المسافة بين بطنين متتاليين هى $\lambda/2$ وحيث أن $\lambda = 2L$ ، إذن يمكننا قياس تردد اهتزاز القضيب ثم استخدام المعادلة (١٤ - ١) لحساب سرعة الموجة المستعرضة فيه .

وإذا كان القضيب مثبتا كما فى الشكل ١٤ - ١١ ، أى على مسافة قدرها $L/4$ من نهايته بالتحديد ، فإن الاهتزاز سيبدو كما فى الجزء ب من هذا الشكل . ومرة ثانية ، يجب أن يكون طرفا القضيب بطنين تقريبيتين ، كذلك فإن نقطة التثبيت يجب أن تكون عقدة أيضا . وفى هذه الحالة :

$$\lambda = L$$

أما فى الحالة المبينة فى الشكل ١٤ - ١٠ فإن :

$$\lambda = 2L$$

شكل (١٤ - ١١)
يجب أن يكون موضع
التثبيت عقدة .

وحيث أن تردد الاهتزاز يعطى بالعلاقة :

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

إذن ، تردد الاهتزاز فى كل من هاتين الحالتين سيكون كمايلى :

$$f = \frac{v}{2L} : ١٠ - ١٤$$

$$f = \frac{v}{L} : ١١ - ١٤$$

أى ان تردد القضيب فى الحالة المبينة فى الشكل ١٤ - ١١ ضعف تردده فى الحالة المبينة فى الشكل ١٤ - ١٠ . وبقياس f و L يمكننا حساب قيمة v فى كل حالة كما وضحنا سابقا* .

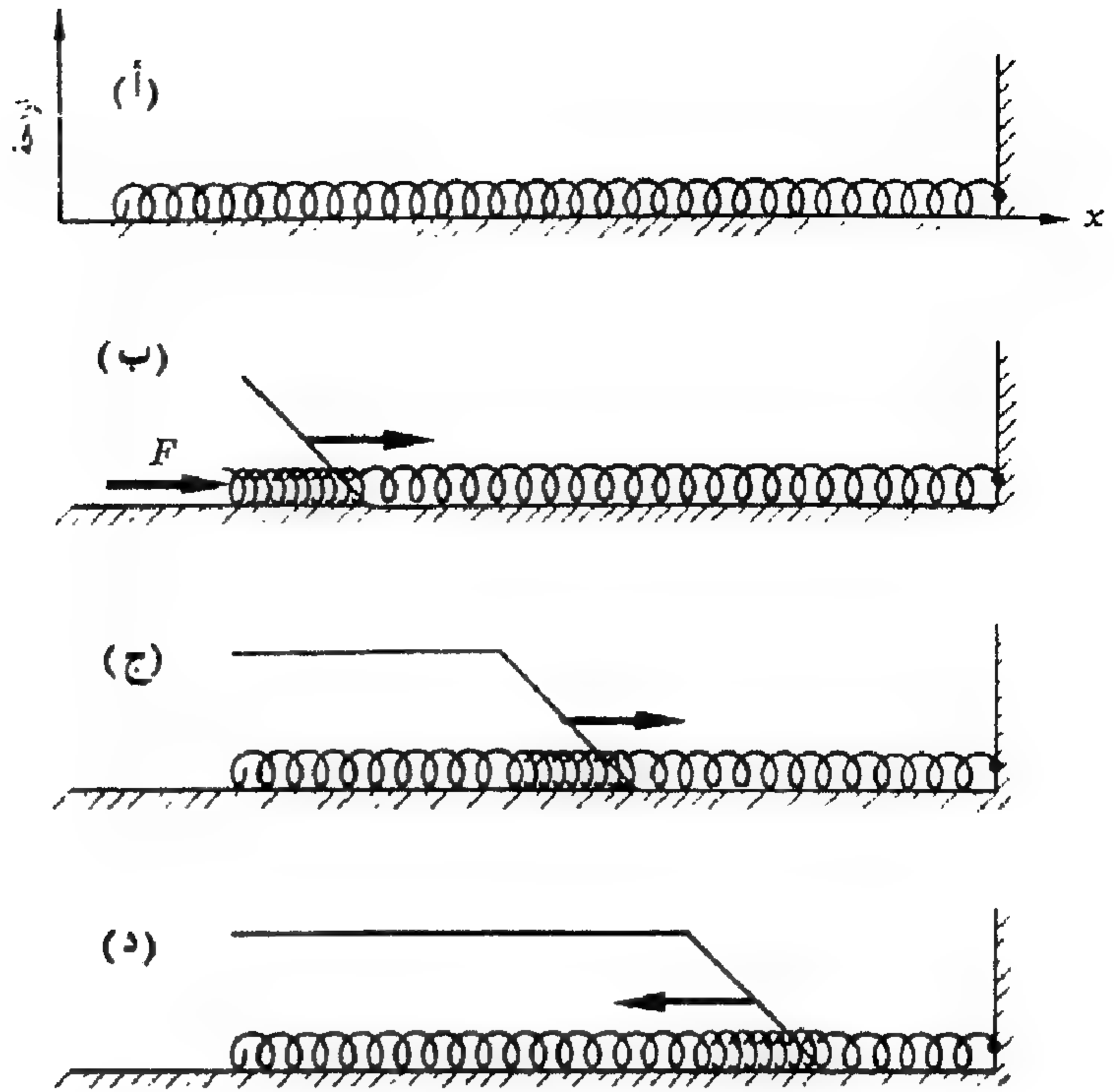
هناك أشكال كثيرة أخرى من الموجات المستعرضة . فالموجات المتكونة على سطح الماء هى موجات مستعرضة تقريبا ، لأن جزيئات الماء تتحرك رأسيا إلى أعلى وإلى أسفل بينما تتحرك الموجات أفقيا على سطح الماء . وسوف نتحدث عن هذه الموجات كثيرا عندما نبدأ دراساتها للموجات الضوئية لأن هناك تشابها كبيرا بينهما .

كذلك عند طرق جلدة الطبلية تتحرك الموجات المستعرضة على سطحها . وتتكون مثل هذه الموجات فى الصنج أو أى لوح مستو من مادة عند اهتزازه . وهذه الموجات أكثر تعقيدا من الموجات المتكونة على وتر لأنها تنتشر فى أى اتجاه فى المستوى ، بينما تتحرك الموجات المستعرضة فى الوتر فى اتجاه واحد فقط . وفى هذه الحالة تتكون على المستوى خطوط عقدية بدلا من النقاط العقدية ، وهى خطوط لا يهتز فيها اللوح إطلاقا . ولكننا لن نناقش هذا السلوك هنا ، ولكننا سنتعرض له فيما بعد عند دراسة الضوء حيث سنقابل موقفا مشابها .

وفى النهاية ، يجب أن نشير إشارة سريعة لأكثر الأنواع أهمية من الموجات المستعرضة ، وهى الموجة الكهربائية المغنطيسية . وسوف نناقش هذا النوع من الموجات بعد دراسة موضوع الكهرباء . وسوف نرى عندئذ أن موجات الراديو والرادار والحرارة والموجات تحت الحمراء وموجات الضوء والموجات فوق البنفسجية وكذلك أشعة اكس هى جميعها أنواع من الموجات الكهربائية المغنطيسية . وواضح من هذه القائمة أن الموجات الكهربائية المغنطيسية ذات أهمية عملية كبيرة .

* تبين الحسابات التفصيلية التى تأخذ تأثيرات القصور الذاتى والجسوء المحدودة أن هذه الحسابات تقريبية . وعمليا تتكون العقدة فى الشكل ١٤ - ١١ على بعد $0.224 L$ وليس $0.250 L$

شكل (١٤ ١٢)
تتحرك نبضة طولية على
الزنبرك وتنعكس بواسطة
الحائط . وتمثل المنحنيات
السوداء الرسوم البيانية
لإزاحة الزنبرك .



١٤ - ٧ الموجات الطولية

يمكننا إجراء تجربة هامة باستخدام زنبرك طويل جدا موضوع على منضدة ملساء ومثبت من أحد طرفيه ، ويوضح الشكل ١٤ - ١٢ أ - د صورة لهذه التجربة ولكنها ليست أحسن الصور من وجهة النظر العملية .

يمثل الجزء أ من الشكل الزنبرك مستقرا على المنضدة في حالة توازن . وإذا ضغط الزنبرك فجأة كما هو في الجزء ب فإن الحلقات القريبة من الطرف سوف تنضغط قبل أن يتعرض باقي الزنبرك للاضطراب . وعندئذ سوف تؤثر الحلقات المنضغطة بقوة معينة على الحلقات التي تقع على يمينها ، وعليه فإن الانضغاط سوف يتحرك في الزنبرك كما هو مبين . وعندما يصل الانضغاط إلى الطرف الثابت فإنه سوف ينعكس ويتحرك إلى اليسار كما هو مبين في الجزء د .

من الواضح أن هذه الموجة ليست موجة مستعرضة ، لأن جزيئات الزنبرك تهتز في الواقع ذهابا وإيابا في اتجاه الزنبرك ، أى في اتجاه انتشار الموجة . وتسمى مثل هذه الموجة الانضغاطية ، التي تتحرك فيها جزيئات الوسط في اتجاه انتشار الموجة بالموجة الطولية .

تعريف

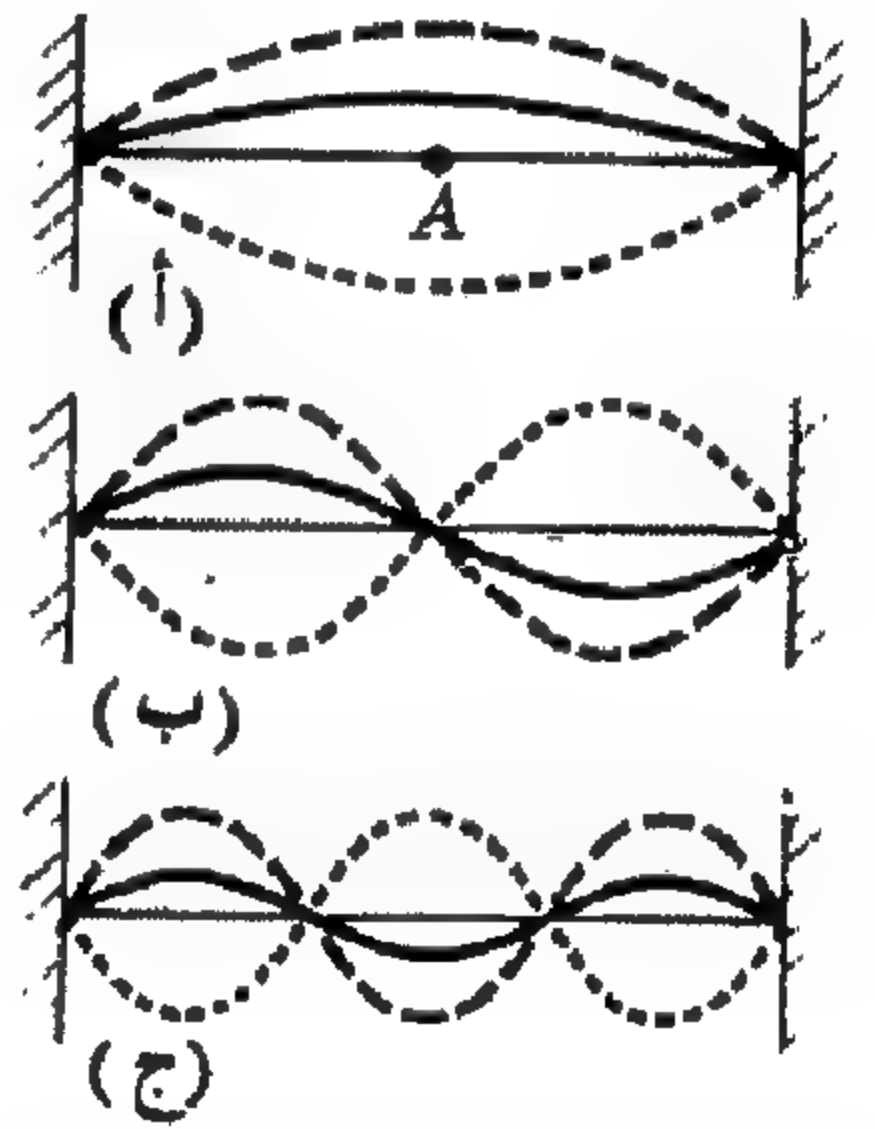
قد تقابلنا بعض الصعوبة عندما نحاول تمثيل الموجة الطولية بيايا . ففي الموجة المستعرضة تتحرك الجزيئات إلى أعلى وإلى أسفل مثلا ، ولذلك فإن الإزاحة تمثل في الرسم البياني إلى أعلى وإلى أسفل أيضا . ولكن من الصعب هنا أن نرسم إزاحة الزنبرك في نفس اتجاه حدوثها ، لأن المسافة التي تقطعها الموجة والإزاحة تقعان كلتاهما في الاتجاه الأفقي . للتغلب على هذه الصعوبة سوف نمثل مقدار الإزاحة رأسيا كما هو موضح بالمنحنى الأسود في الشكل ١٤ - ١٢ . وهنا يجب أن نعلم جيدا أن الحركة لا تحدث أبدا في هذا الاتجاه في حالة الموجة الطولية ، وأنا نرسم هذا الشكل البياني بهذه الطريقة للتوضيح فقط .

١٤ - ٨ الموجات التضاغية المستقرة على زنبرك

من الواضح أن هناك ملامح كثيرة مشتركة بين الموجة الطولية على زنبرك والموجة المستعرضة على وتر . فإذا تحركت موجة تضاغية على زنبرك فإن الموجة وطاقتها سوف ينعكسان عند وصول الموجة إلى نهاية الزنبرك ، وهذه الموجة المنعكسة يمكنها أن تتداخل مع موجات أخرى ساقطة من المصدر . فإذا تحققت العلاقة المناسبة بين تردد المصدر الحافز الذي يسبب اهتزاز طرف الوتر ومختلف ثوابت الزنبرك فإن الرنين سوف يحدث . وهذا ماسوف ندرسه الآن عن الأنظمة الزنبركية .

وكما في حالة رنين الأوتار ، توجد دائما عقدة بالقرب من موضع المصدر الحافز لأن الزنبرك نفسه سوف يتحرك في حالة الرنين حركة أكبر كثيرا من المصدر الحافز ، وأيضا ، إذا كان الطرف الآخر للزنبرك مثبتا جيدا في حائط أو جسم آخر مشابه ، فإن هذا الطرف سيكون عقدة كذلك . عندئذ يجب أن تظهر الحركة الرنينية للزنبرك كما هو موضح بالرسم البياني في الشكل (١٤ - ١٣) .

شكل (١٣ - ١٤)
تكون الموجات المستقرة
نتيجة للاهتزاز الطولي
للزنبرك .



لاحظ أن حركة الزنبرك تحدث في الاتجاه الأفقي بالرغم من أننا رسمنا إزاحة حلقات الزنبرك في موازاته رأسيا . فمثلا ، النقطة A في الشكل ١٤ - ١٣ تعني أن النقطة المركزية للزنبرك تهتز أفقيا ذهابا وإيابا وأن سعة الاهتزاز تمثل بالموجة المنقطة . يلاحظ أيضا من نمط الاهتزاز الموضح في الشكل ١٤ - ١٣ ب أن النقطة المركزية لا تتحرك على الإطلاق . إذن ، يمكن أن تكون النقطة المركزية بطنا أو عقدة ، ويعتمد ذلك على التردد الذي يسبب رنين الزنبرك .

تنطبق نفس العلاقات الخاصة بانتشار الموجات على وتر أيضا على الموجات المنتشرة على زنبرك . ووضح من الشكل ١٤ - ١٣ أن المسافة بين عقدتين متتاليتين تساوي $\lambda/2$ أيضا كما في حالة الوتر . كذلك فإن طول الزنبرك يجب أن يكون مساويا لعدد صحيح من أنصاف الطول الموجي وذلك في حالة الرنين . أى أن الطول الموجي في حالة الرنين يعطى بالعلاقة .

$$n \frac{\lambda}{2} = L$$

حيث $n = 1, 2, \dots$

وبالتعويض من هذه العلاقة في المعادلة $\lambda = v/f$ سنجد أن الترددات الرنينية للزنبرك تعطى بالعلاقة :

$$f = n \frac{v}{2L}$$

حيث $n = 1, 2, \dots$

مثال توضيحي ١٤ - ٣ : اهتز زنبرك طوله 300 cm اهتزازا رنينيا في ثلاث قطع (كل منها بين عقدتين) عندما كان التردد الحافز 20 Hz . ماهى سرعة الموجة في الزنبرك ؟

طريقة الحل . يهتز الزنبرك كما في الشكل ١٤ - ١٣ جـ . ووضح في هذه الحالة أن :

$$3 \frac{\lambda}{2} = L$$

أو :

$$\lambda = 200 \text{ cm}$$

وبالتعويض عن $f = 20 \text{ Hz}$ في العلاقة $\lambda = v/f$ نجد أن :

$$v = (20 \text{ s}^{-1})(200 \text{ cm}) = 4000 \text{ cm/s}$$

كان في الإمكان بالطبع أن نعوض ببساطة في المعادلة :

$$f = n \frac{v}{2L}$$

المعطاه سابقا ، حيث $n = 3$. ومع ذلك فإن معظم الفيزيائيين لا يفضلون حفظ معادلات مختلفة للحالات المختلفة ، إذ يستخدمون عادة عدد أنصاف الطول الموجي في الزنبرك كله لإيجاد λ ثم يستخدمون العلاقة $\lambda = v/f$ لإيجاد f . وفي الحقيقة فإن الأغلبية العظمى من حالات الرنين التي سوف نقابلها يمكن أن توصف باستخدام هذه العلاقة ودراسة النظام الرنيني ، وليس من الضروري إذن أن نحفظ معادلة لكل حالة .

١٤ - ٩ الموجات التضاغطية على قضيب

ناقشنا سابقا الاهتزاز المستعرض للقضيب ، ومع ذلك فإن من الممكن أن يهتز القضيب اهتزازا طوليا كذلك . وهناك طرق كثيرة ممكنة لتحقيق ذلك ، وربما كانت أبسط الطرق هي أن يطرق طرف القضيب كما هو مبين في الشكل ١٤ - ١٤ أ .

تسبب الطريقة على طرف القضيب تكون موجة تضاغطية تسير في القضيب تجاه الطرف الآخر . وهذه الموجة معقدة جدا ، وتتكون في الواقع من مجموعة كبيرة من الموجات ذات ترددات مختلفة . وحيث أن الترددات الرنينية للقضيب محدودة تماما ، لذلك فإنه سوف يهتز رنينيا استجابة لتردد واحد من هذه المجموعة .

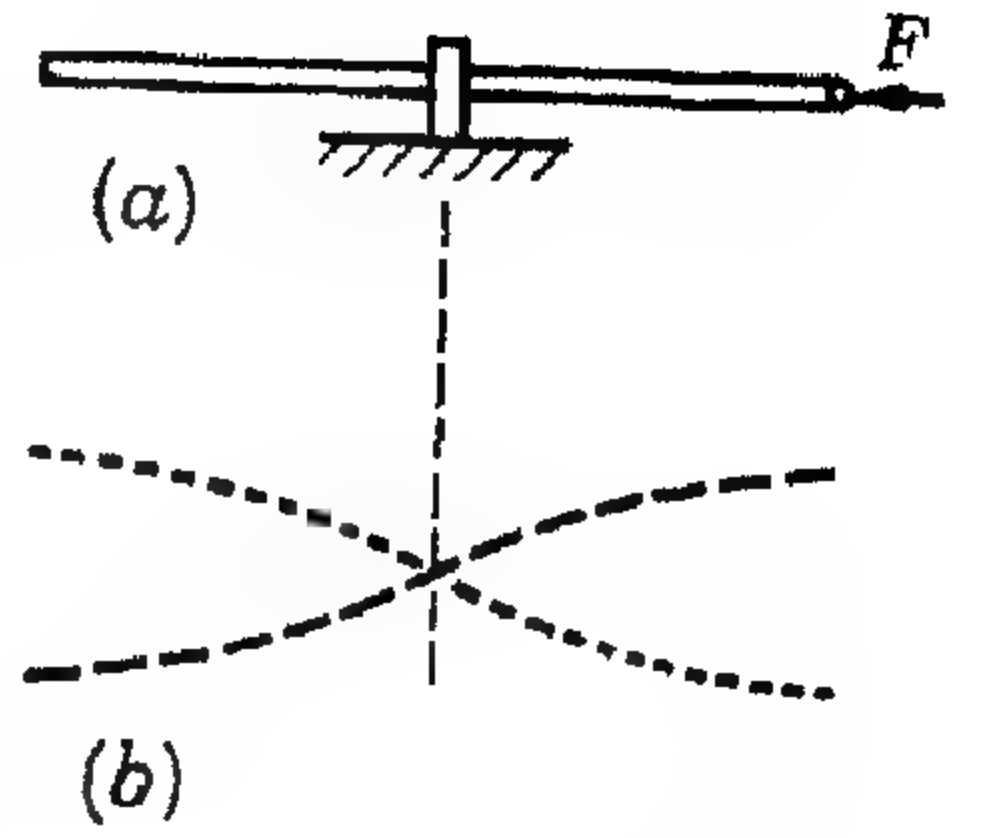
وفي هذه الحالة الخاصة يجب أن تتكون عقدة في مركز القضيب وبطنان عند طرفيه ، ويوضح الشكل ١٤ - ١٤ أ أقل تردد رنيني لهذا النمط الاهتزازي . تذكر أن حركة القضيب طوليه بالرغم من أن الرسم البياني للحركة مشابه لحالة الاهتزاز المستعرض . من الواضح في هذه الحالة أن طول القضيب يساوي نصف الطول الموجي ، فإذا كان طول القضيب L ، معلوما فإن الطول الموجي سيكون إذن معلوما . فإذا كان تردد اهتزاز القضيب معلوما كذلك ، يمكننا بسهولة حساب سرعة الموجات التضاغطية في مادة القضيب باستخدام العلاقة $\lambda = v/f$ (يمكن قياس تردد اهتزاز القضيب بطريقة بسيطة وهي مقارنة الصوت الصادر من القضيب بالصوت الصادر من شوكة رنانة ترددها معلوم . وسوف نناقش فيما بعد طرقا أكثر دقة لتحديد تردد الاهتزاز الطولي لقضيب) . ويمثل الجدول ١٤ - ١ بعض القيم الفعلية لسرعة الموجات التضاغطية في مواد مختلفة .

هناك ترددات رنينية أخرى لاهتزاز القضيب المبين في الشكل ١٤ - ١٤ ، والترددات الممكنة هي تلك التي تتكون فيها عقدة في مركز القضيب وبطنان عند طرفيه . وسوف نترك للقارئ أن يوجد بنفسه التردد الرنيني التالي لاهتزاز القضيب في هذه الحالة . وعندئذ سيتضح أنه لا بد من وجود ثلاث عقد على القضيب . (لماذا يعتبر نمط الاهتزاز بعقدتين على القضيب نمطا ممنوعا ؟) وحيث أن فواقد الطاقة نتيجة للزوجة تصبح أكثر أهمية عند الترددات العالية ، فإن هذه الأنماط الاهتزازية تضعف وتتضاءل بسرعة ، ولذلك فإن طاقتها تظهر كحرارة ويتوقف القضيب عن الاهتزاز .

تعتمد سرعة الموجات التضاغطية في المواد المختلفة على كثافة ومرونة هذه المواد . ويمكننا إثبات أن سرعة هذه الموجات في السوائل تعطى بالعلاقة :

(١٤ - ٤)

$$v = \sqrt{\frac{E}{d}}$$



شكل (١٤ - ١٤)

تنشأ موجات طولية مستقرة عند الطرف على القضيب كما هو مبين .

جدول (١٤ - ١)
سرعة الموجات
التضاغطية في
مواد مختلفة

المادة	السرعة m/s
هواء (0°C)	331
ماء (15°C)	1447
محاس	3500
زجاج	4000-5500
حديد مطاوع	4900-5100
صلب	5000

حيث d كثافة المادة ، E معامل الحجم المعروف بالمعادلة (٩ - ٨) . لاحظ أن الوحدات الواجب استخدامها في هذه العلاقة يجب أن تكون متساوية دائما . وفي حالة القضبان يجب استخدام معامل يونج Y بدلا من معامل المرونة الحجمية E .

مثال توضيحي ١٤ - ٤ : إذا كان طول القضيب المبين في الشكل ١٤ - ١٤ هو 0.925 m وتردده الرنيني في هذه الحالة هو 2700 cps ، أوجد معامل يونج للمعدن إذا كانت كثافته 7.86 g/cm^3 .

طريقة الحل . نحتاج أولا إلى إيجاد السرعة v وذلك باستخدام المعادلة (١٤ - ٤) ومن الشكل ١٤ - ١٤ . نرى أن طول القضيب وقدره 0.925 m يكافئ $\lambda/2$ ، إذن $\lambda = 1.85 \text{ m}$ وتطبيق العلاقة $v = \lambda f$ (وباستخدام الوحدات SI) نحصل على :

$$v = (1.85 \text{ m})(2700 \text{ s}^{-1}) = 5000 \text{ m/s}$$

ومن المعادلة (١٤ - ٤) نجد أن :

$$(5.00)(10^3 \text{ m/s}) = \sqrt{\frac{Y}{7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}}$$

أو :

$$Y \approx 2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

وبالرجوع إلى الجدول ٩ - ٢ الذى يمثل معامل يونج لمختلف المواد سنجد أن القضيب قد يكون مصنوعا من الحديد .

ملخص

المذبذب الذى يتحرك حركة توافقية بسيطة يمكنه أن يكون موجة جيبية على وتر . المسافة بين قمتى موجة متجاورتين تساوى الطول الموجى للموجة λ . يرتبط الطول الموجى λ بتردد الاهتزاز f وسرعة الموجة v بالعلاقة $\lambda = v/f$ وهذه علاقة عامة تنطبق على جميع الموجات .

ينص مبدأ تراكم الموجات على أن الجسم الذى يقع تحت تأثير اضطرابين موجيين أو أكثر يستجيب للمجموع الاتجاهى للاضطرابين المنفردين .

يهتز الوتر رنينيا تحت تأثير قوة حافزة تتبع قانون الحركة التوافقية البسيطة تحت شروط معينة . يحدث الرنين في حالة الوتر المثبت جيدا من طرفيه إذا كان طول الوتر $n(\lambda/2)$ ، حيث n أى عدد صحيح . عندئذ يهتز الوتر بنمط ثابت معين يسمى الموجه المستقرة (أو الواقفة) . في مثل هذا النمط تنعدم الحركة تماما في نقط معينة تسمى العقد . تصل سعة الاهتزاز إلى أقصى قيمة في نقط معينة على الوتر تسمى البطن . المسافة بين عقدتين (أو بطنين) متتاليتين تساوى دائما $\lambda/2$ في الموجه المستقرة (أو الواقفة) .

عندما تتعرض الجزيئات لاضطراب موجى تتحرك عموديا على اتجاه انتشار الموجه ، يقال أن هذه الموجه مستعرضة . من الأمثلة النموذجية للموجات المستعرضة الموجات على وتر والموجات الكهربائية المغنطيسية . ولكن إذا كانت الجزيئات تتحرك في اتجاه انتشار الموجه ، يقال أن هذه الموجه تضاغطية أو طولية . من أمثلة هذا النوع الموجات التضاغطية على زنبرك أو في الغازات والسوائل والجوامد .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

- ١ - تخطيط رسم بياني لموجة جيبية تتحرك على وتر وتوضيح الملامح التالية بالنسبة لها : القمة ، القرار ، الطول الموجي ، السعة .
- ٢ - توضيح ما يحدث عندما تصل نبضة موجية إلى الطرف المثبت والطرف الحر لوتر وذلك بالرسم .
- ٣ - ذكر العلاقة بين λ ، v ، f لأي موجة .
- ٤ - رسم عدد من الموجات الواقفة (أو المستقرة) لوتر مثبت جيدا من طرفيه وتوضيح مواقع العقد والبطن . استخدام عدد القطع في الموجة المستقرة لكتابة العلاقة بين L ، $\lambda/2$ لكل نمط اهتزاز ترسمه ، ثم حساب v أو f للوتر بمعلومية L وأي من f أو v .
- ٥ - شرح الفرق بين الموجة المستعرضة والموجة الطولية واعطاء أمثلة لكل منهما .
- ٦ - رسم الموجة التضاغمية المستقرة لنمط الرنين في الحالات المختلفة الآتية :
(أ) وتر مثبت جيدا من كلا طرفيه ، (ب) قضيب مثبت من نقطة واحدة عندما تبعد هذه النقطة مسافة قدرها $0.5L$ أو $0.25L$ عن أحد طرفيه .
- ٧ - حساب تردد الرنين لكل من الحالات المدرجة في البند ٦ بمعلومية البيانات الكافية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتي :

الطول الموجي

القمة ، القرار

$$\lambda = v_T = v/f$$

الموجة المستعرضة ، الموجة الطولية

الرنين ، الموجة المستقرة (أو الواقفة)

العقدة ، البطن

متفق الطور

طول الفلقة $\lambda/2$

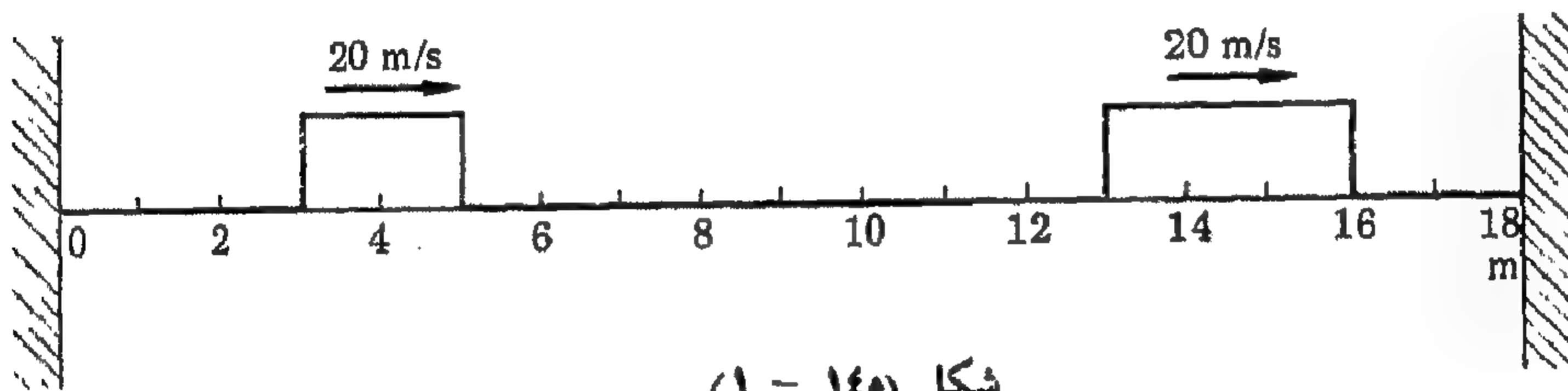
اسئلة وتعليمات

- ١ - تتحرك النبضتان الموجيتان المثلثتان الموضحتان في الشكل م ١٤ - ١ على وتر بسرعة قدرها 20 m/s . بين بالرسم شكل الوتر بعد مرور 0.40 s كرر هذا العمل بعد مرور 0.20 s .
- ٢ - اذكر الحجج والبراهين الفيزيائية الكيفية لحقيقة أن سرعة الموجات المستعرضة على وتر يجب أن تزداد بزيادة الشد وتقل بزيادة كتلة وحدة الطول من الوتر .
- ٣ - تصنع أوتار بعض الآلات الموسيقية الوترية من أمعاء القطط الملفوف عليها سلك دقيق . ما فائدة السلك الملفوف ؟
- ٤ - يهتز وتر مثبت من طرفيه مع تكون أربع بطون عليه ، أي أنه منقسم إلى أربع قطع . هل يمكننا أن نلمس الوتر بحد السكين دون أن يضطرب اهتزازة ؟ اشرح .
- ٥ - يقوم مذبذب متغير التردد بإرسال الموجات إلى وتر (طوله L) يمكن اعتبار طرفيه عقدتين . ثبت الوتر في نقطة تبعد مسافة $L/5$ عن أحد طرفيه بمشبك صغير بحيث أمتنعت حركة الوتر في هذه النقطة بالرغم من أن المشبك لا يزال يسمح للطاقة بالمرور . صف الموجات المستقرة التي سوف تلاحظ على الوتر عند زيادة تردد المذبذب ببطء ابتداء من قيمة منخفضة جدا .

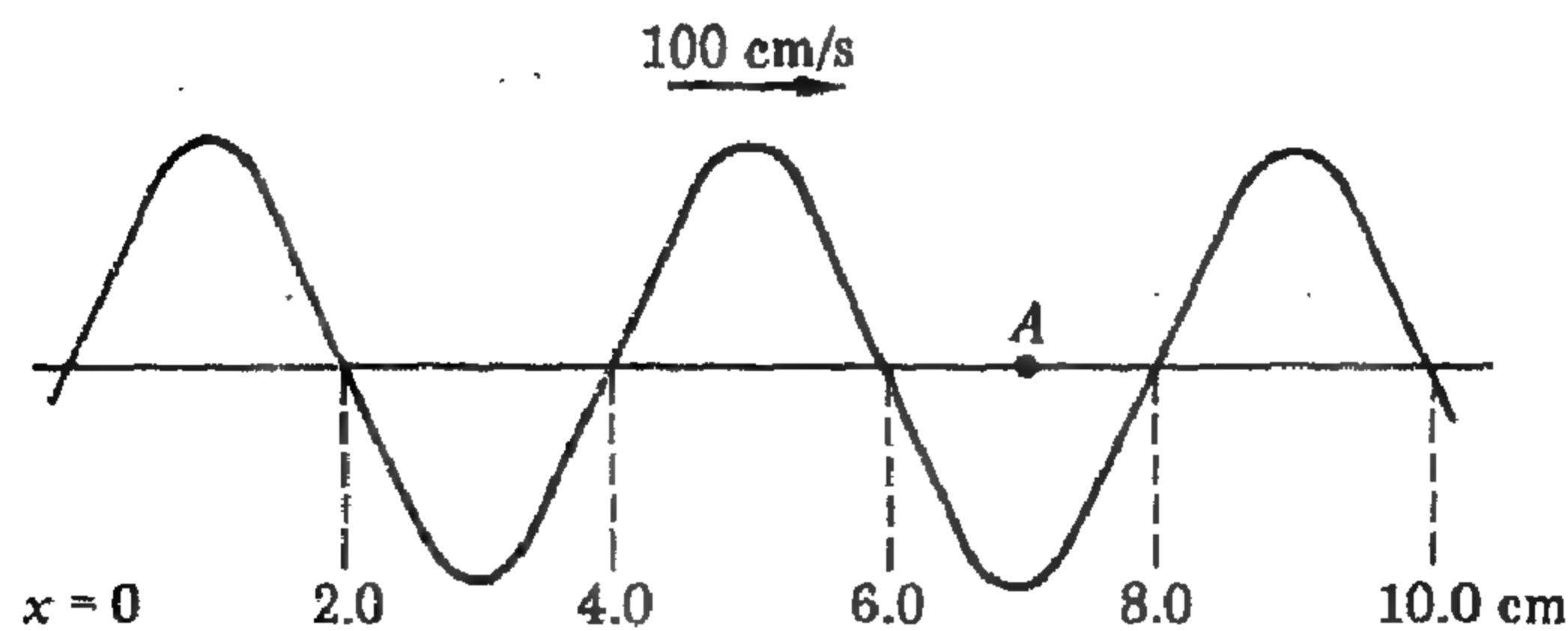
- ٦ - تحتوى اجزاء الوتر الصغيرة القريبة من البطون على طاقة حركة كبيرة . اشرح كيف تنتقل الطاقة من المصدر إلى البطون بالرغم من أن طاقة حركة اجزاء الوتر القريبة من العقد صغيرة جدا .
- ٧ - عند رنين الوتر ثلاثى كل من الموجتين الساقطة والمنعكسة الأخرى عند مواضع العقد . هل فقدت الطاقة ؟ ماذا حدث لها ؟
- ٨ - وصل كل من طرفي وتر مشدود بأحد مذبذبين متماثلين تماما . وضبط هذان المذبذبين بحيث يهتز الوتر اهتزازا رنينيا مستعرضا عندما يعمل احد المذبذبين فقط . هل يحدث الرنين عندما يعمل المذبذبان في نفس الوقت ؟ وإذا كان هذا صحيحا ، فتحت أى شروط يحدث ذلك ؟
- ٩ - تتمدد جميع المعادن العادية عند تسخينها . اقترح طريقة لمراقبة تغير درجة حرارة سلك باستخدام ظاهرة الاهتزاز الرنيني . يستطيل السلك المصنوع من الصلب حوالى 0.001% عند تغير درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة . هل تعتقد أن طريقة الاهتزاز عملية ؟
- ١٠ - هل يمكن أن تؤدي موجتان متماثلتان تسيران في نفس الاتجاه على وتر إلى تكوين موجة مستقرة ؟
- ١١ - أسقط قضيبا من المعدن أو قضيبا زجاجيا أو مسطرة خشبية على أحد الطرفين على أرضية صلبة . ومن الصوت الناتج من ذلك قدر التردد الاساسي للرنين ومنه قدر سرعة الموجة التضاغطية والضوئية في المادة المصنوع منها .
- ١٢ - ضبط وتر جيتار مصنوع من الصلب على نغمة ترددها 330 Hz . قدر بالتقريب التغير في تردد الوتر عندما تنخفض درجة الحرارة بمقدار 20°C . (ق)

مسائل

- ١ - اعتبر النبضتين الموجيتين المبينتين في الشكل م ١٤ - ١ اللتين تتحركان على الوتر بسرعة قدرها 20 m/s . بعد أى زمن من اللحظة الحالية ستظهر النبضتان مرة ثانية بنفس الشكل المبين ؟
- ٢ - تتحرك الموجة المبينة في الشكل م ١٤ - ٢ تجاه اليمين بسرعة قدرها 100 m/s . (أ) ماعدد قمم الموجة الذى يصل إلى النقطة A في الثانية ؟ (ب) ماهو الطول الموجي للموجة ؟ (ج) ماهو تردد الموجة كما يحسب من العلاقة $\lambda = v/f$ (د) قارن الاجابتين بالجزئين (أ) ، (ج) .



شكل (م ١٤ - ١)



شكل (م ١٤ - ٢)

٣ - يندفع الريح بشدة على سلك تليفون مشدود بين قائمين البعد بينهما 15 m ، ونتيجة لذلك يطن السلك في الريح بتردد قدره 20 Hz ، ولذلك يمكننا أن نفترض أن السلك يهتز بذلك التردد . بفرض أن نقطتي تثبيت السلك في القائمين هما عقدتان ، (أ) ماهو الطول الموجي المحتمل ؟ (ب) ماهي سرعة الموجة التي يسببها الريح في السلك ؟

٤ - شد وتر « وزنه » 4.0 g وطوله 2.0 m افقيا بوضع احد الطرفين على بكرة وتعليق كتلة قدرها 1.0 kg فيه . اوجد سرعة الموجة المستعرضة في الوتر .

٥ - ماهو الثقل الذي يجب تعليقه في طرف خيط طوله 200 cm لكي تكون سرعة الموجات المستعرضة فيه 400 cm/s ، علما بأن « وزن » كل 100 cm من الخيط هو 0.50 g .

٦ - سلك مشدود بين نقطتين البعد بينهما 50 cm . وعندما نقر السلك بالقرب من المركز اصدر نفس النغمة التي تصدرها شوكة رنانة ترددها 250 cps . اوجد الطول الموجي وسرعة الموجة في هذا السلك . تلميح : حيث أن السلك قد نقر من مركزه ، فإنه سوف يهتز بحيث يتكون علبة بطن واحدة وعقدتين عند الطرفين .

٧ - يهتز سلك طوله 80 cm بحيث تتكون عليه أربع عقد ، اثنتان منهما عند الطرفين . اوجد (أ) الطول الموجي ، (ب) سرعة الموجة في السلك إذا كان تردد اهتزازه 500 Hz .

٨ - يهتز سلك مثبت من طرفيه بشدة في ثلاث قطع عندما يكون التردد الحافز f_1 وفي أربع قطع عندما يكون التردد الحافز f_2 . اوجد النسبة f_1/f_2 ؟

٩ - وتران متساويان تماما في الشد وفي الطول ، ومع ذلك فإن أقل تردد رنيني لأحدهما يساوي نصف تردد الآخر فقط . (أ) أيهما اكبر في الكتلة لوحدة الطول ؟ (ب) ماهي النسبة بين كتلتي وحدة الطول لهذين السلكين ؟

١٠ - يهتز وتر مثبت من طرفيه اهتزاز رنينيا بعدة ترددات ، أقلها 100 Hz . ماهي الترددات الرنينية الثلاثة التالية ؟

١١ - يهتز وتر اهتزاز رنينيا في ثلاث قطع عندما يكون التردد الحافز 60 Hz اكتب أربعة ترددات رنينية أخرى لهذا الوتر .

١٢ - قضيب حديدي طوله 100 cm مثبت في منتصفه ويهتز اهتزازا طوليا . (أ) اوجد أقل تردد رنيني لهذا القضيب . (ب) اوجد أقل تردد رنيني له إذا كان مثبتا عند أحد طرفيه . ($v = 5 \times 10^3$ m/s)

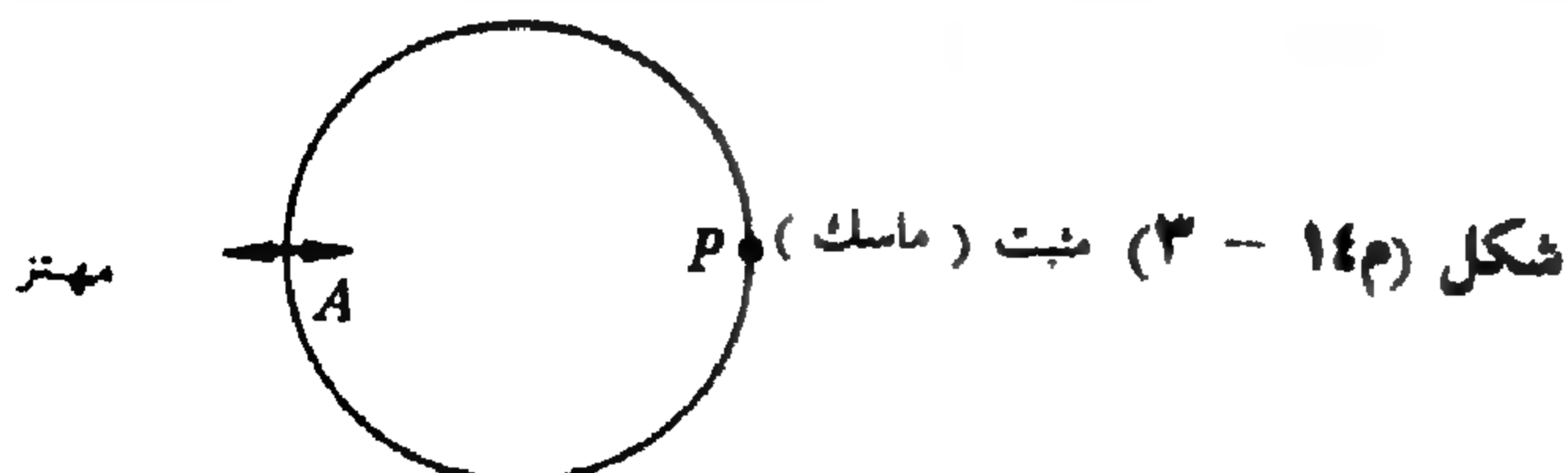
١٣ - قضيب حديدي طوله 100 cm ومثبت على بعد 25 cm من أحد طرفيه . اوجد أقل تردد رنيني للموجات الطولية فيه . ($v = 5 \times 10^3$ m/s)

١٤ - زنبك ملتف طوله 4.0 m يهتز اهتزازا طوليا تحت تأثير مهتز متصل بأحد طرفيه . وعندما كان التردد الحافز 2.0 Hz ، كان الزنبك يهتز مع تكون خمس بطون عليه . ماهي سرعة الموجات التضاغطية في الزنبك ؟ افترض أن طرفي الزنبك عقدتان .

١٥ - قضيب من الصلب طوله 1.00 m مثبت من أحد طرفيه . ماهي الترددات الرنينية الثلاث الأولى للموجات التضاغطية ؟ ($v = 5000$ m/s)

* ١٦ - زنبك ملتف طوله 4.0 m موضوع على منصدة ملساء وأحد طرفيه ثابت والآخر حر . اوجد بعض الترددات التي يمكن أن تضرب بها النهاية الحرة للزنبك بحيث تتكون فيه موجات تضاغطية رنينية ، علما بأن سرعة الموجات التضاغطية فيه 800 cm/s .

* ١٧ - يمثل الشكل م ١٤ - ٣ سلكا من الصلب على هيئة حلقة نصف قطرها 20 cm . ثبتت الحلقة جيذا عند النقطة P وأرسلت فيها موجات مستعرضة بواسطة مهتز عند النقطة A . بفرض أن النقطتين P ، A عقدتان ، اوجد الترددات الرنينية الثلاثة الأولى لهذه الحلقة . (سرعة الموجات المستعرضة في الحلقة هي $v = 0.4$ m/s) .



الفصل الخامس عشر

الصوت

سنطبق الآن المفاهيم المتعلقة بالحركة الموجية والتي ناقشناها في الفصل السابق على نوع معين من الحركة الموجية وهو الصوت . وليست دراسة الصوت مهمة في حد ذاتها فقط ، ولكنها بالإضافة إلى ذلك تزودنا بوسيلة قيمة جدا لتقوية معلوماتنا عن الحركة الموجية عموما . وسوف نجد أن كثيرا من المبادئ والأفكار التي سوف نناقشها فيما يتعلق بالصوت ذات أهمية كبيرة أيضا في دراستنا للضوء ولأنواع أخرى من الحركة الموجية .

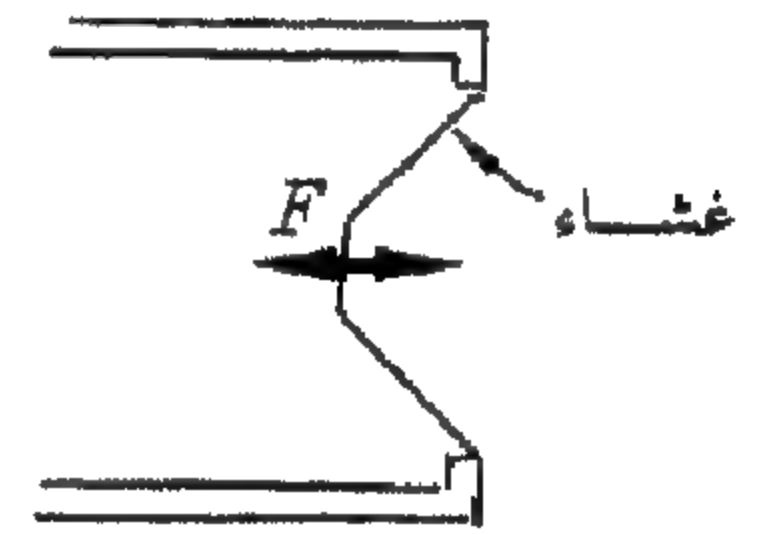
١٥ - ١ منشأ الصوت

تعريف

يعرف الصوت عادة بأنه أى اضطراب تضاعطى ينتقل فى المادة بحيث يسبب حركة طبله الأذن ، ويؤدى بالتالى إلى الاحساس بالسمع .

ونحن نعتقد عامة أن الصوت عبارة عن موجة تضاعطية فى الهواء ، لأن الأذن توجد عادة فى حالة تلامس مع الهواء . ومع ذلك فإن الصوت يمكن أن يصل مباشرة إلى الأذن تحت الماء بواسطة اهتزاز الماء نفسه على طبله الأذن . وعلى أى حال فإن الصوت هو اهتزاز مادى لا يمكن أن يحدث الا فى وجود وسط ناقل للموجات . والمثال الشهير فى هذا الخصوص هو أننا لن نسمع دقات جرس كهربائى موجود داخل ناقوس مفرغ من الهواء بالرغم من اهتزاز الريشة وطرقها للجرس ، وذلك لعدم وجود مادة حول الجرس يمكنها أن تنقل الاهتزاز إلى خارج الناقوس .

هناك شيئان ضروريان لانبعاث الصوت وانتشاره . (١) لابد من وجود جسم يهتز بحيث يصدر الموجات التضاعطية . وسواء كان هذا الجسم وترًا مهتزًا أو الصندوق المصوت للكمّان أو الاهتزاز الشديد بالقرب من سهم نارى مفرق ، فإنّ هذا ذا أهمية ثانوية فقط . ذلك أن الصوت يصدر من الجسم المهتز فى كل حالة . (٢) لابد من وجود مادة لنقل الصوت . فوتر الكمّان ، مثلاً ، ينقل الصوت إلى الهواء المحيط ، وهذا بدوره يحمل الاهتزاز إلى الأذن . أما إذا اهتز وتر الكمّان فى الفراغ فإننا لن نسمعه لأن الاهتزاز لا ينتقل إلينا من الوتر .



شكل (١٥ - ١)
يهتز غشاء الجهاز المرن ذهاباً وإياباً ويحدث التضاعطات فى الهواء

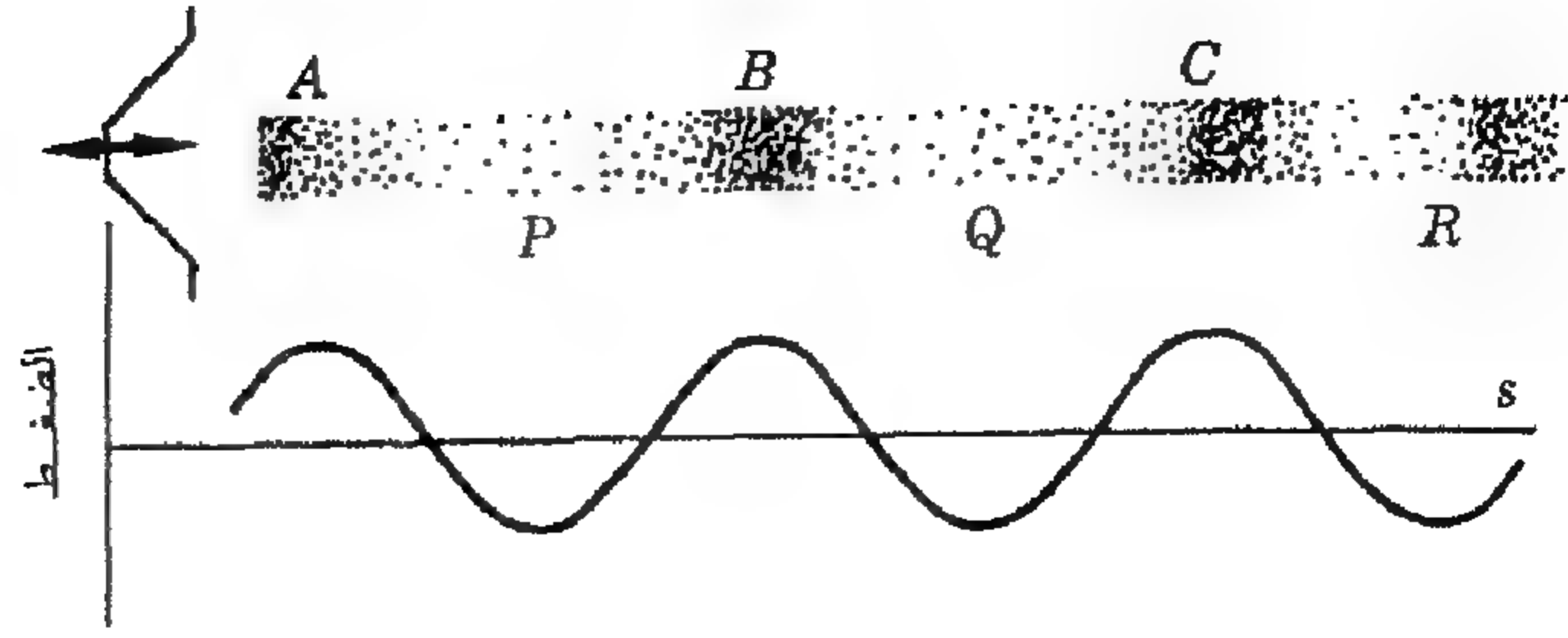
١٥ - ٢ الموجات الصوتية فى الهواء

لنعتبر الآن عمل الجهاز (مكبر الصوت) عند استخدامه فى إصدار الأصوات البسيطة . يتركب الجهاز البسيط من لوح مخروطى الشكل من مادة مرنة يمكنه أن يتذبذب ذهاباً وإياباً تحت تأثير القوة الحافزة المتذبذبة F المؤثرة على مركزه كما هو مبين فى الشكل ١٥ - ١ .

عندما يتحرك الغشاء إلى اليمين فإنه يضغط الهواء الملاصق له ، وبذلك تنطلق موجة تضاعطية فى الهواء . وفى لحظة تالية يتحرك الغشاء إلى اليسار ، تاركاً وراءه منطقة من الهواء ذات ضغط منخفض ، وهو ما يسمى بالتخلخل . وهذا الاضطراب أيضاً ينطلق من الجهاز وينتشر فى الهواء . ويتكرر هذه العملية مرات كثيرة تنطلق من الجهاز سلسلة من الموجات الضاغطة التى تتكون من مناطق ذات ضغط مرتفع (التضاعطات) ومناطق ذات ضغط منخفض (التخلخلات) ، وهذا موضح فى الشكل ١٥ - ٢ .

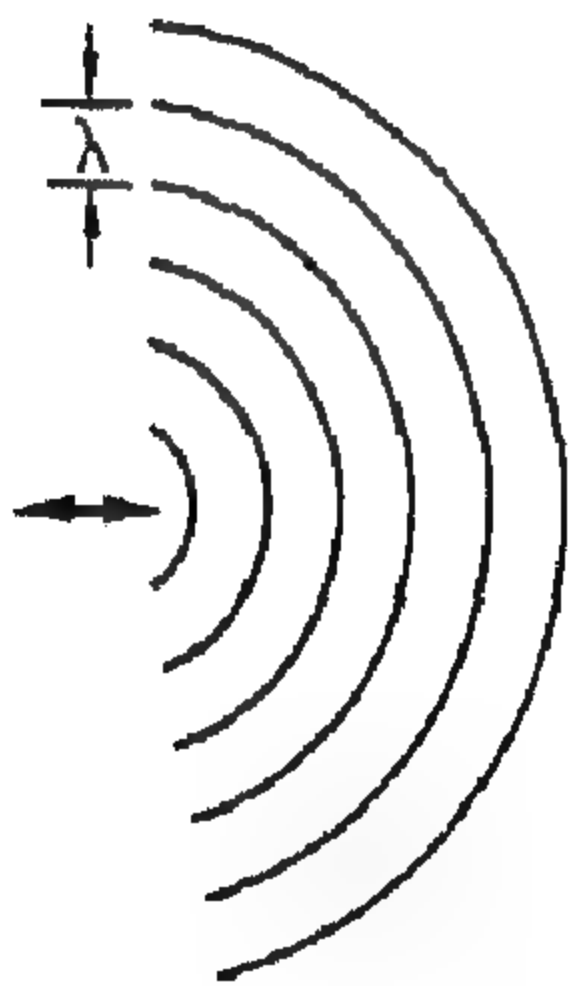
شكل (١٥ - ٢)

تتكون الموجة الصوتية الصادرة من المجهر من مناطق ذات ضغط مرتفع وأخرى ذات ضغط منخفض على التوالي . وعمليا يتغير P بما يساوى حوالى 0.01% فقط أو أقل .



توضح التضاعطات المنبعثة من المجهر في الهواء بينما يتحرك نحو اليمين بالحروف A ، B ، C في هذا الشكل . وعندما يتحرك الغشاء إلى اليسار فإنه يترك وراءه منطقة شبه مفرغة ، وبذلك تنطلق التخلخلات P ، Q ، R من المجهر . ويوضح الجزء السفلى من الشكل رسما بيانيا لتغير ضغط الهواء في هذه الموجة الصوتية . لاحظ أن الخط المركزى لا يمثل الضغط الصفرى ، ولكنه يكافئ قيمة متوسط الضغط الجوى . وتعتبر التخلخلات في هذا الشكل مناطق ذات ضغط منخفض نوعا ما . ويفترض في هذا الشكل أن الغشاء يهتز اهتزازا جيبيا . ويراعى أن التغيرات الحقيقية في الضغط ، حتى للأصوات الجهيرة جدا ، لا تزيد عن حوالى 0.01% فقط من قيمة الضغط الجوى .

من المناسب أحيانا أن نتحدث عن ازاحة جزيئات الهواء تحت تأثير الموجة الصوتية بدلا من الحديث عن الضغط فيها . ومن المؤكد أن جزيئات الهواء تتحرك ذهابا وإيابا بنفس الطريقة التى يتحرك بها الغشاء ذهابا وإيابا . ويلاحظ في هذه الحالة أن الحركة الاهتزازية لجزيئات الهواء في نفس اتجاه انتشار الموجة الصوتية ، وعليه فإن هذه الموجة موجة طولية . علاوة على ذلك ، حيث أن الهواء يهتز بنفس طريقة اهتزاز الغشاء ، يمكننا أن نتوقع إذن أن الرسم البيانى لازاحة الجزيئات سيكون مماثلا للرسم البيانى الموضح في الشكل ١٥ - ٢ . وبالرغم من ذلك فإن أحد الرسمين سيكون مزاحا عن الآخر بمقدار ربع دورة . لماذا ؟



شكل (١٥ - ٣)

المسافة بين قمم الموجات (الجبهات الموجية) المتتالية ، والمنبعثة من المجهر ، تساوى الطول الموجى .

ترسم الموجات الصوتية المنبعثة من المصدر عادة كما هو موضح في الشكل ١٥ - ٣ . وتمثل الخطوط المستمرة نقطة معينة على الموجات أثناء تحركها في الهواء . وترسم هذه الخطوط (المسماة جبهات الامواج) عادة عند قمم الموجات . ويلاحظ أن المسافة بين جبهات الأمواج هذه هى المسافة من قمة موجة إلى القمة التى تليها أى الطول الموجى λ . ورغم أن معظم مكبرات الصوت تركز الموجات الصوتية بعض الشيء في اتجاه معين ، فإن الأمواج تنتشر في اتجاهات كثيرة من المصدر كما في الشكل ١٥ - ٣ ، وتتحرك الموجات في الهواء بسرعة الصوت .

١٥ - ٣ سرعة الصوت

الموجات الصوتية هي موجات تضاغية في المادة . ولقد رأينا في الفصل السابق أن سرعة هذه الموجات في الموائع تعطى بالمعادلة (١٤ - ٤) :

$$v = \sqrt{\frac{E}{d}}$$

حيث d كثافة المائع ، E معامل الحجم ويعطى بالعلاقة :

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

حيث ΔV هو مقدار التغير في الحجم V الذي يسببه تغير في الضغط قدرة ΔP . لاحظ أن السوائل صعبة الانضغاط (E كبير) ولذلك فإن سرعة الصوت فيها v كبيرة . من هذا نرى أن الصوت يتحرك بسرعة أكبر من المواد الصعبة الانضغاط والمواد ذات الكثافة الصغيرة . وقد ذكرنا سابقا سرعة الصوت في المواد المختلفة في الجدول ١٤ - ١ .

تعتبر سرعة الصوت في الهواء ثابتا ذا أهمية عملية خاصة ، وقيمتها عند درجة $0^\circ C$ هي 331 m/s أى 1086 ft/s . وتزداد قيمة سرعة الصوت في الهواء بحوالى 0.60 m/s لكل ارتفاع في درجة الحرارة مقداره $1^\circ C$ وذلك بالقرب من درجات الحرارة العادية للهواء . يمكننا كذلك أن نعتبر ، كتقريب معقول ، أن سرعة الصوت في الغازات المثالية لا تعتمد على ضغط الغاز .

١٥ - ٤ شدة وجهازة الاصوات

رأينا في الفصل السابق أن المهتز الذى يرسل الموجة على وتر يبعث الطاقة أيضا مع هذه الموجة . وفي الحقيقة فإن جميع الموجات تحمل الطاقة معها ، ولاتستثنى الموجات الصوتية من ذلك . فمثلا ، يبعث المجهار المبين في الشكل ١٥ - ٣ بطاقة الموجة الصوتية ، وتنتشر هذه الطاقة في اتجاه انتشار الموجة .

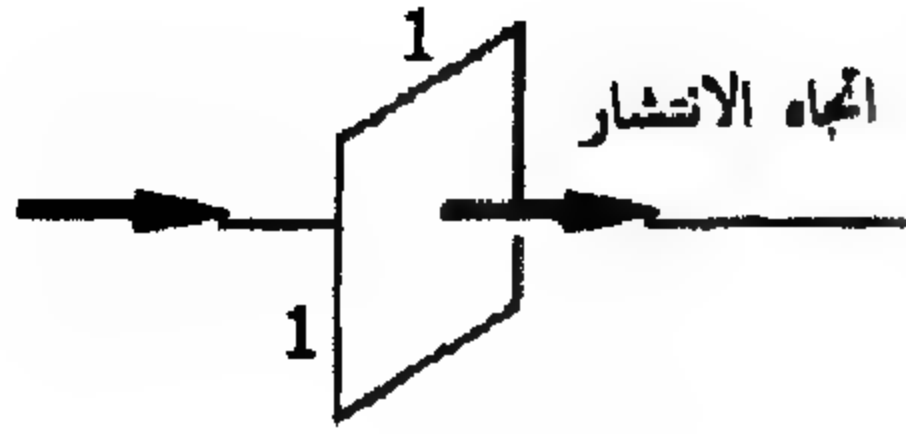
نوع الصوت	شدة الصوت W/m^2	مستوى شدة الصوت dB
الصوت المسبب للألم	1	120
ثقابة الصخور التى تعمل بالهواء المضغوط أو مكينة البرشمة	10^{-2}	100
طريق كثيف المرور*	10^{-5}	70
التخاطب العادى*	10^{-6}	60
الممس المتوسط الارتفاع*	10^{-10}	20
حفيف الشجر*	10^{-11}	10
الصوت المسموع بالكاد	10^{-12}	0

جدول ١٥ - ١

القيم التقريبية لشدة بعض الأصوات

* إذا كان الشخص قريبا من مصدر الصوت

لنفرض أن الموجة الصوتية تتحرك في اتجاه الانتشار المبين في الشكل ١٥ - ٤ . ونحن نعرف شدة الموجة بدلالة الطاقة التي تحملها هذه الموجة . ولكي نتحرى الدقة ، سنرسم مساحة قدرها الوحدة عمودية على اتجاه الانتشار المبين . وعندئذ سوف نعرف شدة الموجة بأنها الطاقة التي تحملها الموجة في الثانية عبر وحدة المساحات العمودية على اتجاه انتشار الموجة . وحيث أن الشدة هي الطاقة في الثانية ، إذن شدة الصوت هي القدرة المارة خلال وحدة مساحات عمودية على اتجاه انتشار الموجة . ووحدات شدة الصوت هي الواط لكل متر مربع . ويوضح الجدول ١٥ - ١ شدة بعض الأصوات . لاحظ أن مدى شدة الصوت الذي تستطيع الأذن أن تسمعه واسع جدا . وبين هذا أن الأذن جهاز قياس مذهل الحساسية .



شكل (١٥ - ٤)

تقاس شدة الصوت بكمية الطاقة المارة خلال وحدة المساحات في الثانية . ويجب أن تكون هذه المساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة .

للتعبير عن طريقة استجابة الأذن للأصوات بطريقة أفضل يستخدم عادة مقياس شدة الصوت ، أو مقياس الديسيبل ، المبني على قوى الرقم 10 والموضح في الجدول ١٥ - ٢ .

جدول ١٥ - ٢

مقياس الديسيبل*

شدة الصوت W/m^2	مستوى شدة الصوت dB
10^{-12}	0
10^{-11}	10
10^{-10}	20
10^{-9}	30
\vdots	\vdots
10^{-1}	110
1	120
10	130

* $10 \text{ dB} = 1 \text{ B(bel)}$. ونسمى

الوحدة « بل » بهذا الاسم نسبة إلى الكسندر جراهام بل مخترع الهاتف .

لاحظ أن الحد الأدنى لشدة الصوت المسموع بالكاد للأذن المتوسطة أي ($10^{-12} W/m^2$) هو الصفر في مقياس الديسيبل . وكلما ازدادت شدة الصوت 10 أضعاف يرتفع مستوى شدة الصوت بالديسيبل بمقدار 10 وحدات ، وقد وجد أن الأذن تحكم على الأصوات طبقا لمقياس الديسيبل . فمثلا ، يعتبر الشخص أن جهازة الصوت قد تضاعفت إذا ارتفع مستوى الجهازة حوالي عشرة ديسيبل .

يمكننا تعريف مقياس الديسيبل في صورة رياضية كما يلي :

مقياس الديسيبل مستوى شدة الصوت بوحدة ال dB = $10 \log \frac{I}{I_0}$ (١٥ - ١)

حيث I شدة الصوت بالواط لكل متر مربع ، $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ، وهي كمية اختيارية تعتبر كمستوى مرجعي . وكما نرى فإن الأذن تستجيب للوغاريتم شدة الصوت . ولهذا السبب يقال عادة أن الأذن جهاز كشف لوغاريتمي . من المهم أيضا أن نعلم أن العين جهاز كشف لوغاريتمي كذلك ، ولكنه حساس للموجات الضوئية وليس الصوتية بالطبع .

مثال توضيحي ١٥ - ١ : أوجد مستوى شدة الصوت بالديسيبل لموجة صوتية شدتها 10^{-5} W/m^2 .

طريقة الحل . بالتعويض عن $I = 10^{-5} \text{ W/m}^2$ ، $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ في المعادلة (١٥ - ١) نجد أن :

$$\text{مستوى شدة الصوت بالوحدة dB} = 10 \log \frac{10^{-5}}{10^{-12}} = 10 \log 10^7 = 10(7) = 70 \text{ dB}$$

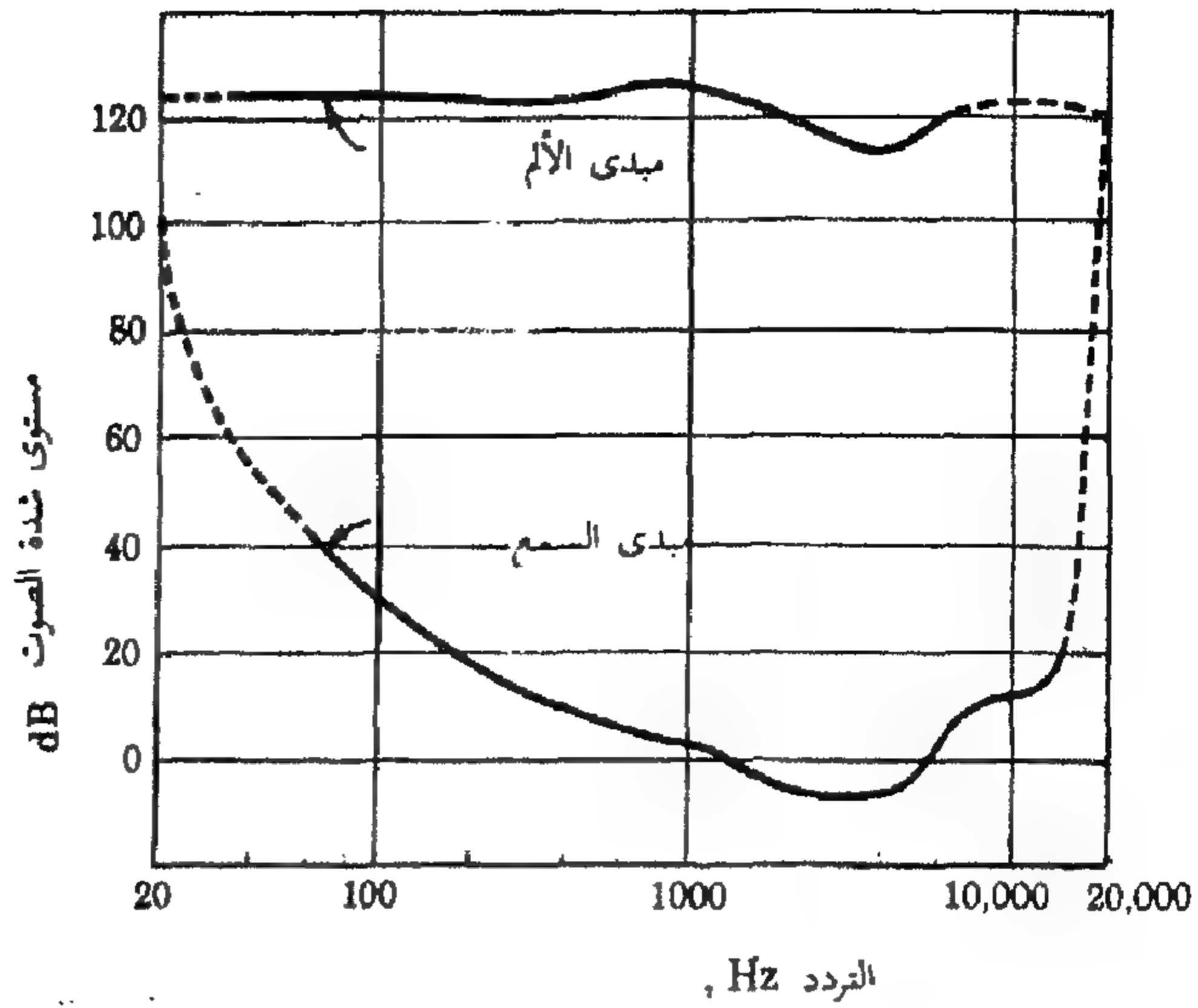
١٥ - ٥ الاستجابة الترددية للأذن

يختلف الناس في مقدرتهم على سماع الأصوات . ونحن نعلم جميعا أن سمع بعض الناس يضعف لسبب من الأسباب ، وعندئذ تقل حساسية آذانهم بدرجة كبيرة عن الشخص العادي . ومع ذلك فإن معظم الناس يتفوقون في شدة الصوت الذي يمكن أن يسمع بالكاد ، وكذلك في جهازة الصوت الذي يسبب الألم . يمكننا أذن وضع حدود متوسطة لقدرة الأذن البشرية العادية . والحد الأدنى هو شدة الصوت المسموع بالكاد ، أما الحد الأقصى فإنه شدة الصوت الذي يسبب الألم للأذن .

لايستطيع معظم الناس أن يسمعوا الموجات التضاغطية في الهواء والتي تزيد ترددها عن حوالي $20,000 \text{ Hz}$. وتسمى الموجات التي يزيد ترددها عن هذه القيمة بالموجات فوق السمعية - بمعنى الصوت « الأعلى » أو « الأكبر » من ناحية التردد . بالمثل لا يستطيع الأذن البشرية أن تسمع الأصوات التي يقل ترددها عن حد معين ، وهو حوالي 20 Hz . وتصل حساسية الأذن إلى أقصى قيمة في مدى التردد القريب من حوالي 3000 Hz . وعند الترددات التي تختلف عن ذلك لابد أن يكون الصوت أكبر في الشدة لكي يمكن سماعه . وهذا التغير في حساسية الأذن مع التردد موضح في الشكل ١٥ - ٥ .

نرى من هذا الشكل أن الأذن العادية غير حساسة إلى حد بعيد للترددات التي تزيد عن حوالي $15,000 \text{ Hz}$ ، والتي تقل عن حوالي 30 Hz . أما الأصوات

شكل (١٥ - ٥)
تستطيع الأذن العادية أن
تسمع الأصوات التي تقع
شدتها فوق المنحنى السفلى في
الشكل .



التي يقع ترددها خارج هذا المدى فيمكن أن تسمع فقط إذا كانت شدة الصوت عالية جدا . لاحظ أن شدة الصوت التي تسبب الألم لا تتغير كثيرا مع التردد .

هناك بعض الناس الذين يعانون ضعفا غريبا إلى حد ما في السمع ، ولا يعلمون هم أنفسهم بذلك ، فهؤلاء الناس لا يمكنهم سماع الصوت الذي يزيد تردده عن حوالي 6000 Hz تقريبا . وحيث أن معظم الأصوات التي نسمعها تتكون ، على الأقل جزئيا ، من ترددات أقل من هذه القيمة ، فإن هؤلاء الناس مازالو قادرين على سماع الأصوات المسموعة لغيرهم . ومع ذلك فإن نوع الصوت الذي يسمعه يختلف تماما عن نوع الصوت الذي يسمعه الشخص العادي . ويعتبر نوع ودرجة الصوت خاصيتين معقدتين وغير موضوعيتين إلى حد كبير ، وسوف نناقشهما في الجزء التالي .

١٥ - ٦ درجة ونوع الصوت

يعمل المجهر على الجودة بواسطة مذبذب كهربائي يولد فلطية جيبيه ، ولهذا فإن الصوت الصادر من المجهر سيكون على شكل موجة جيبيه نقية تقريبا ذات تردد يساوي تردد المذبذب . ويستطيع أى شخص غير أصم للطبقات الصوتية أن يقارن درجة هذا الصوت بدرجة صوت آخر . وإذا رفعنا تردد المذبذب الذي يقوم بتشغيل غشاء المجهر فإن السامع سوف يقرر حالا أن درجة الصوت الجديد أعلى من درجة الصوت الأول . وفي هاتين الحالتين تعتبر درجة الصوت مرادفا لتردده .

ولكن المثال السابق ليس مثالا عاما . فإذا نقر وتر الكمان . مثلا ، بالاصبع أو القوس فإن الموجة الصوتية الصادرة لن تكون موجة جيبيه نقية . وهذا واضح تماما

لأى شخص يقارن النغمة التى يحصل عليها عازف، ماهر من الكمان بتلك التى يحصل عليها عازف مبتدىء . ففي الحالة الأولى تكون النغمة كاملة وشجية ، بينما يحصل العازف المبتدىء فى الحالة الثانية على أصوات ذات صريف خشنة مشيرة للأعصاب من نفس الوتر . ويقال عندئذ أن نوع النغمة مختلف فى الحالتين .

وكما رأينا فى الفصل الرابع عشر ، يمكن أن يهتز الوتر رنينيا بأكثر من طريقة ، ويوضح الشكل ١٥ - ٦ بعض أنماط الاهتزاز البسيطة للوتر ، وتسمى هذه الانماط الاهتزازية كما هو موضح فى الشكل . وحيث أن النسبة بين الأطوال الموجية فى الحالات المبينة هى $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{4}$. وكذلك حيث أن $v/\lambda = f$ فإن النسبة بين ترددات الاهتزاز هى $1 : 2 : 3 : 4$ كما هو موضح فى الشكل .

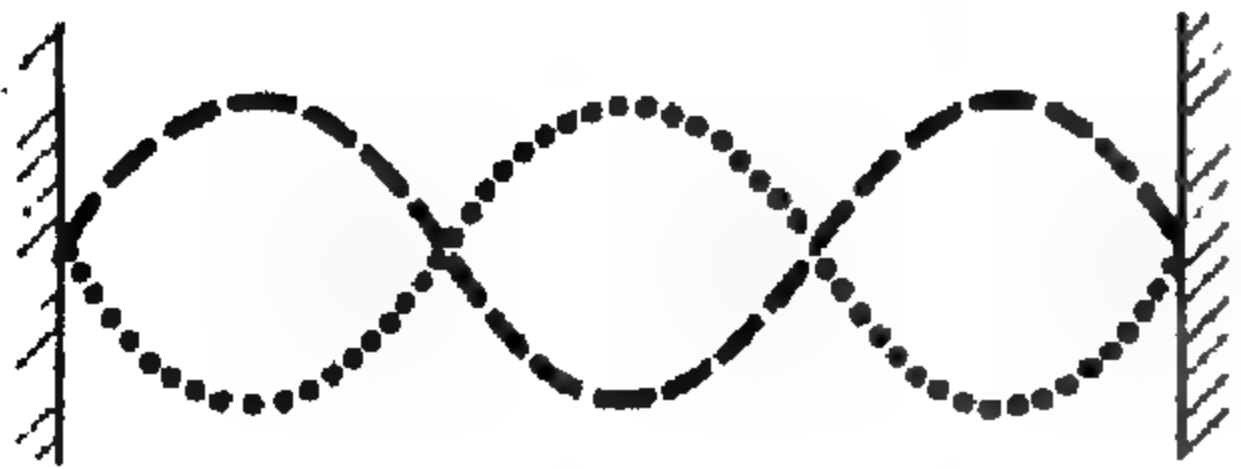
ومع ذلك فإن من الصعب أن نجعل الوتر يهتز كما هو موضح فى كل من الانماط المبينة فى الشكل ١٥ - ٦ بالضبط . وبدلاً من ذلك ، إذا مرر القوس بالقرب من إحدى نهايتي الوتر ، كما هى الحال عادة ، فإن التوافقية الأولى لا تظهر وحدها ، بل يصاحبها عدد من التوافقيات الأخرى فى نفس الوقت . وعندئذ يهتز الوتر فى الواقع بعدة طرق فى نفس الوقت . ولإيجاد الاهتزاز الناتج يجب جمع موجات مختلف التوافقيات التى تظهر . وهناك بالطبع نسب معينة بين شدة مختلف المركبات ، إذ تكون بعض المركبات أكبر شدة من الأخرى .



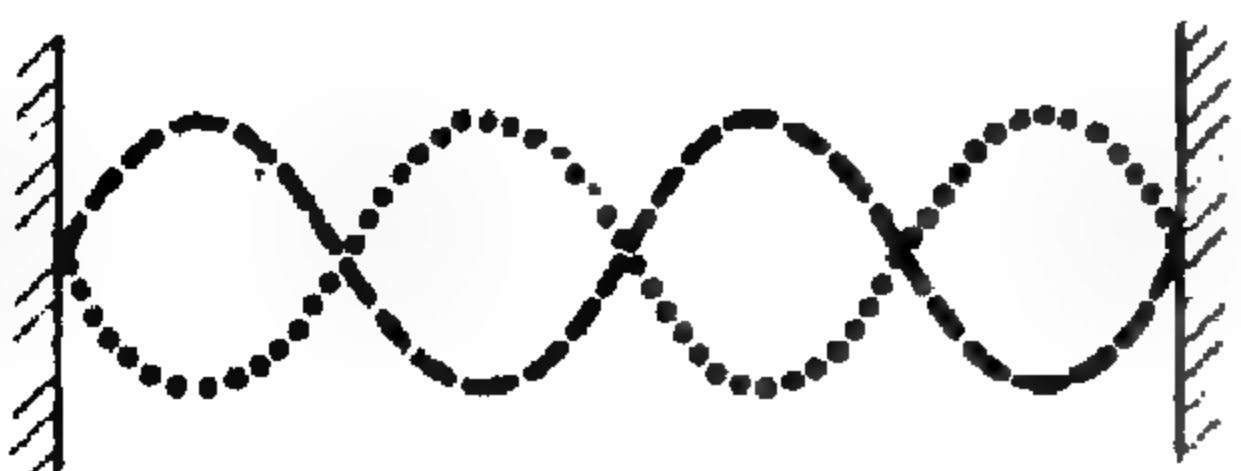
التوافقية الأساسية
التوافقية الأولى } f_1



التوافقية الثانية
النغمة التوافقية الأولى } $2f_1$



التوافقية الثالثة
النغمة التوافقية الثانية } $3f_1$



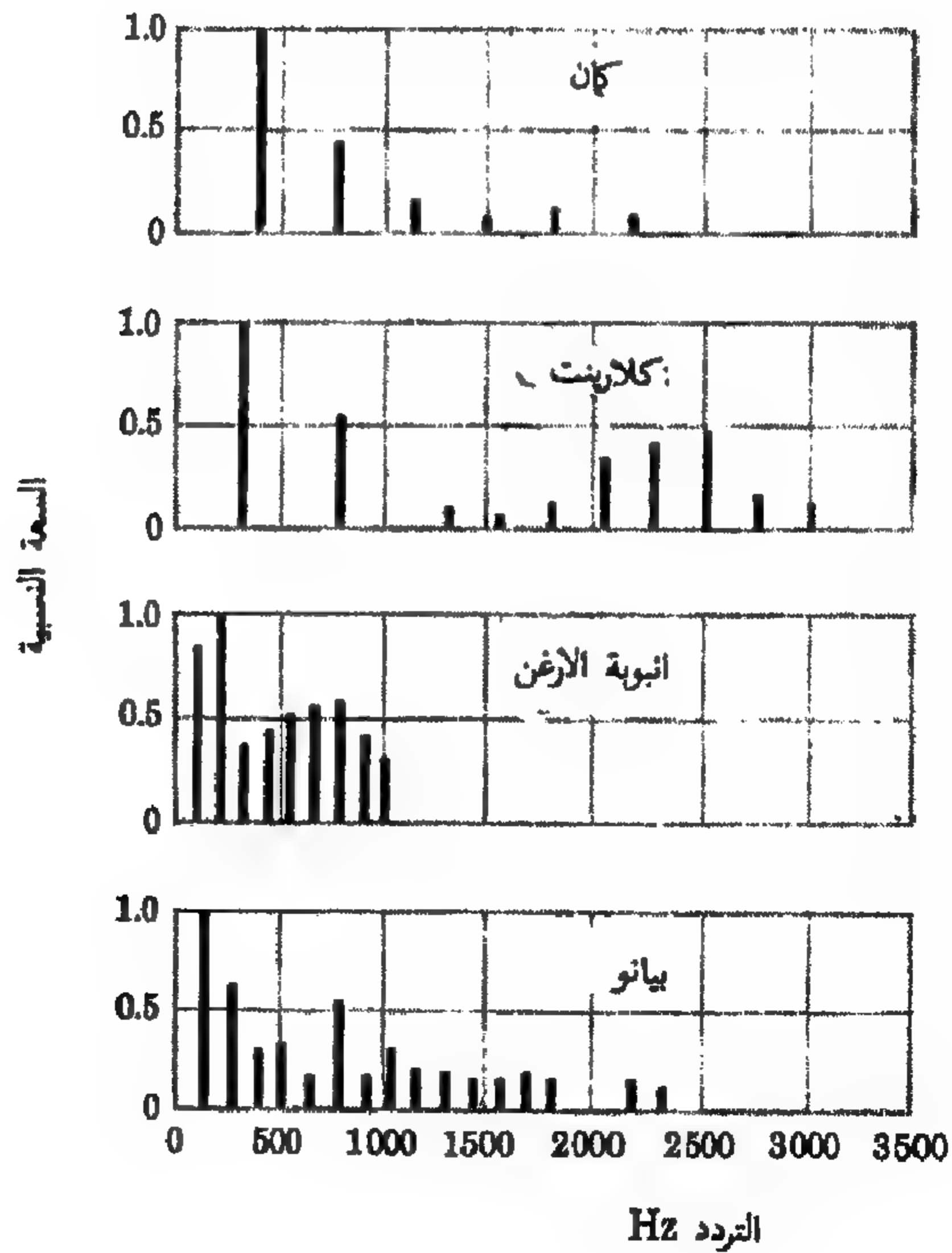
التوافقية الرابعة
النغمة التوافقية الثالثة } $4f_1$

شكل (١٥ - ٦)
أبسط أربعة أنماط للحركة فى
حالة الموجات المستقرة فى
الوتر .

يوضح الشكل ١٥ - ٧ مثالا نموذجيا لاهتزاز وتر الكمان ، وتوضح سعة الاهتزاز لنغمات التوافقيات في هذا الشكل بطول الأعمدة الرأسية . وفي هذه الحالة تعتبر جميع التوافقيات ضعيفة نسبيا باستثناء أول توافقتين . ولكن من الواضح أن النغمة التي تسمعها الأذن ستختلف عن أى من التوافقية الأولى أو الثانية وحدها .

يبين في الشكل ١٥ - ٧ أيضا الاشكال البيانية المماثلة للاصوات الصادرة من بعض الآلات الموسيقية الأخرى . وواضح من هذا الشكل أن وتر البيانو يعطى عددا أكبر من التوافقيات بالمقارنة بوتر الكمان . وربما يكون ذلك راجعا إلى الطريقة المعقدة التي تؤدي إلى اهتزاز وتر البيانو . ففي حالة الكمان يمرر العازف القوس على الوتر ببطء وبطريقة منتظمة ، أما في حالة البيانو فإن الوتر يهتز تحت تأثير ضربة المطرقة .

يعتمد نوع الصوت أو نغمته على عدد وطبيعة التوافقيات الموجودة في هذا الصوت . فإذا كانت جميع الأصوات موجات جيئية نقية فإن هذا سوف يفقد الاصوات قدرا كبيرا من تنوعها . وعندئذ ستكون نغمة جميع الأصوات البشرية واحدة . وسيعرف صوت الانسان في هذه الحالة بالتردد المميز في مقام الصوت أو ارتفاعه . كذلك فإن قدرا كبيرا من جمال الموسيقى سوف يفقد إذا كانت أنواع جميع الاصوات واحدة .



شكل (١٥ - ٧)

لكل آلة موسيقية نغمة تختلف في نوعها عن نغمات الآلات الأخرى . ويوضح الشكل الترددات الموجودة في النغمة والسعة النسبية لها . لاحظ أن التوافقيات ليست دائما بسيطة كما في حالة الوتر .

ليس من السهل دائما تحديد درجة الصوت إذا كان هذا الصوت معقدا كما هو موضح بالنسبة لصوت البيانو أو حتى الكلارينيت ، إذ لا يمكننا اعتبار درجة الصوت مرادفا لتردده ، لأن الصوت يحتوى على عدة موجات مختلفة فى التردد ومتساوية تقريبا . فى السعة . وفى هذه الحالات يكون من الصعب علينا أن نضاهى النغمات بدقة . ولهذا السبب ليس من الغريب مطلقا لمغن غير متمرس يغنى نغمة ترددها ضعف النغمة الاساسية للكمان ألا يلاحظ اختلاف النغمتين ، بالاضافة إلى ذلك فإن كثيرا من المستمعين لن يلاحظوا أن المغنى لا يردد النغمة الصحيحة .

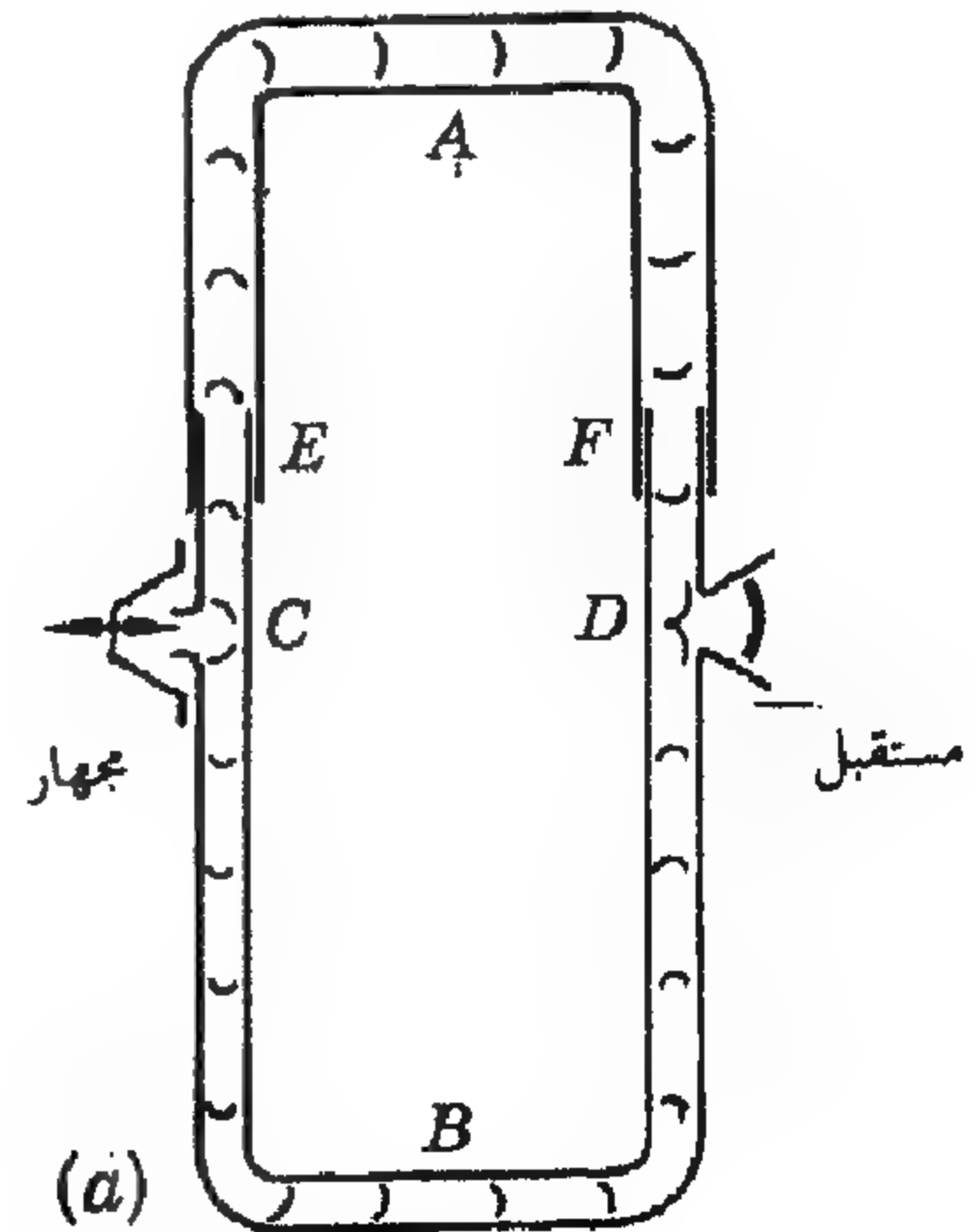
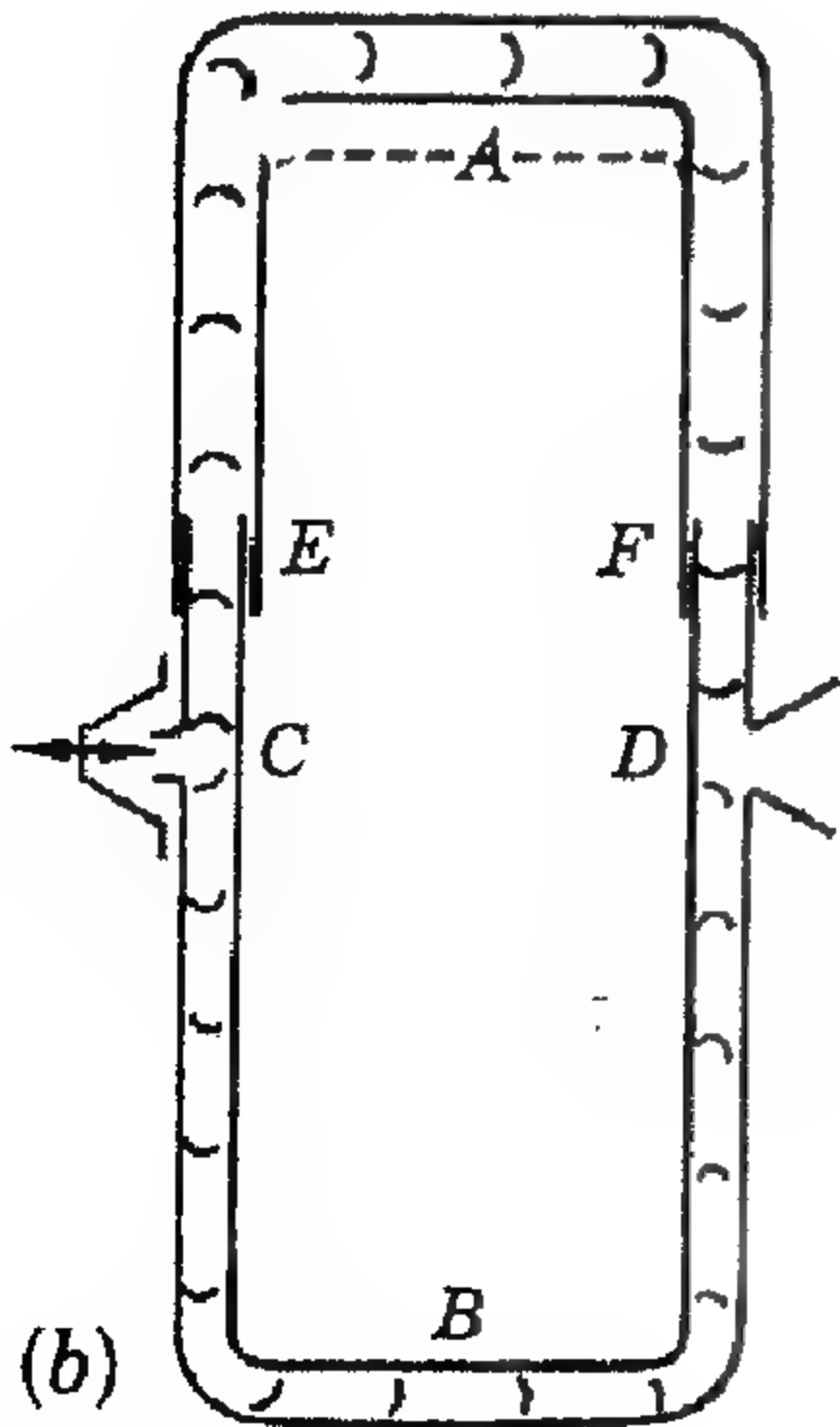
١٥ - ٧ تداخل الموجات الصوتية

لنفرض أن لدينا نظاما أنبوبيا كالمبين فى الشكل ١٥ - ٨ . إذا ارسلت موجة جيبية من الجهة اليسرى للنظام بواسطة مجهر فإن الصوت سينقسم إلى جزئين ، يمر نصف شدة الصوت خلال الجزء A ، بينما يمر النصف الآخر خلال الجزء السفلى . وعندئذ يمكننا أن نقول أن كلا من الأنبوبتين تحمل نصف كمية الصوت ، وهذا الصوت عبارة عن حركة موجية فى الهواء تتكون من سلسلة من التضامعات والتخلخلات .

وفى النهاية تتحد الموجتان الصوتيتان عند المخرج فى الجزء الأيمن ، أى عند النقطة D ، حيث يوضع كاشف صوتى كالأذن أو الميكروفون . وعندئذ سيلاحظ أن شدة الصوت عند النقطة D يمكن أن تكون كبيرة أو صغيرة حسب وضع الأنبوبة المنزلقة EAF . بالاضافة إلى ذلك ، إذا حركنا الأنبوبة A إلى أعلى ببطء ، فإن شدة الصوت عند D ستصبح صغيرة وكبيرة على التتابع . وسندرس الآن أسباب ظاهرة التداخل هذه .

شكل (١٥ - ٨)

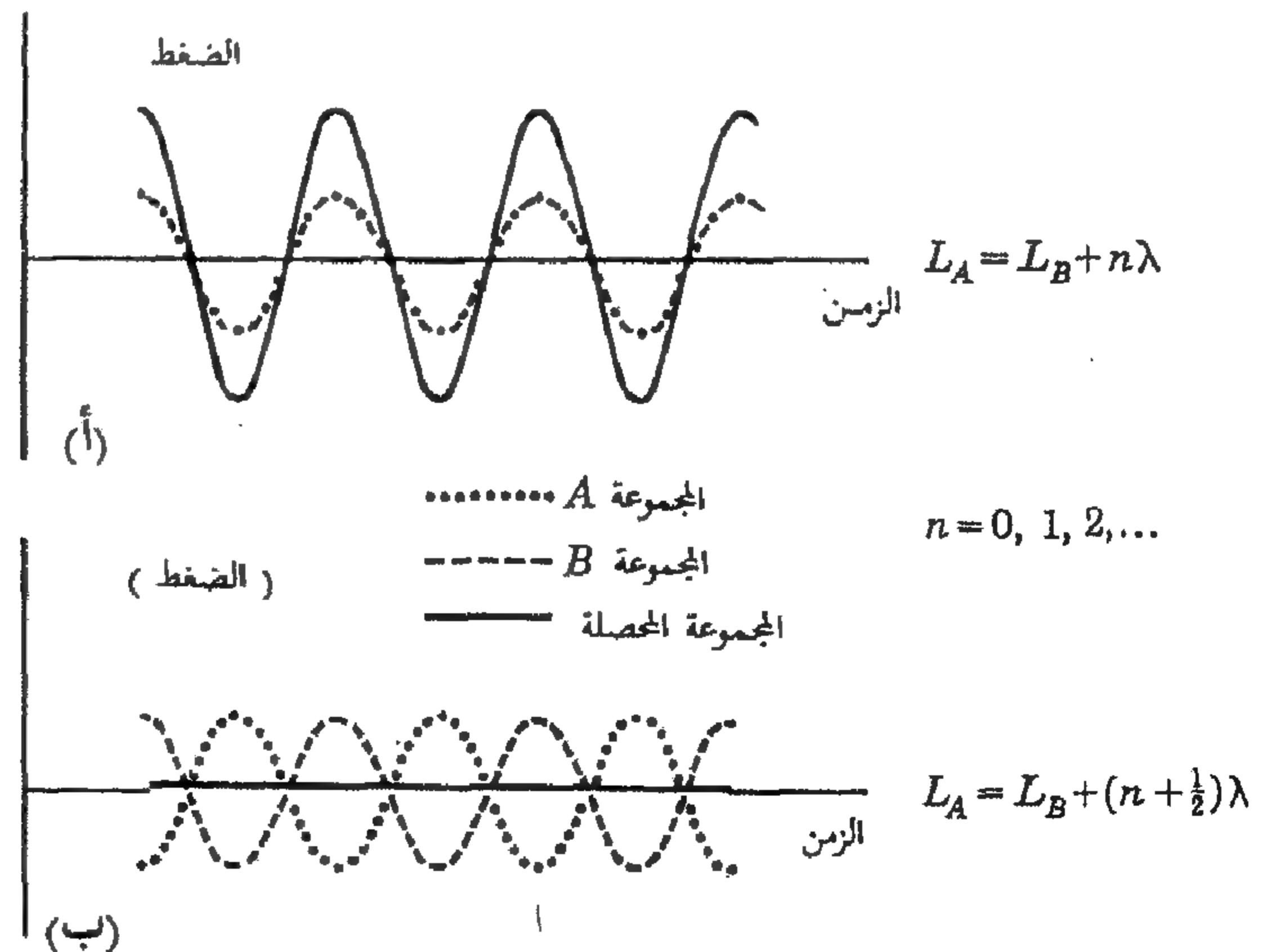
تنقسم الموجة الصادرة من المجهر إلى جزئين . وعندما يتحد هذان الجزآن عند D ، قد نسمع صوتا جهوريا أو ضعيفا ، ويعتمد ذلك على الفرق بين طولى المسارين اللذين يقطعهما نصفى الموجة .



عندما يحدث تضاعف في الهواء نتيجة لحركة غشاء المجهار إلى اليمين ، تتكون منطقة ذات ضغط مرتفع في الأنبوبة عند النقطة C . وهذه المنطقة ذات الضغط المرتفع ، أى التضاعف ، تسبب تحرك تضاعفين في كلا الأنبوبتين . واحد تجاه A والآخر تجاه B - ويمكننا أن نقول أن التضاعف الأصلي في مدخل الأنبوبة قد انقسم إلى جزئين متساويين ، وأن أحدهما يتحرك إلى أعلى تجاه A ، بينما يتحرك الآخر إلى أسفل تجاه B . وحيث أن التضاعف يتحرك في الأنبوبة بسرعة الصوت ، فإن هذين التضاعفين سيصلان إلى النقطة D في نفس اللحظة ، بشرط أن يكون طول الأنبوبة A أى L_A ، مساويا لطول الأنبوبة B أى L_B . عندئذ يتحد هذان التضاعفان مرة أخرى عند D ليكونا التضاعف الأصلي الذى يخرج من الأنبوبة عند D .

وبالطبع فإن المجهار يصدر صوتا نقيًا ، أى موجة جيبية ، مكونا من تضاعفات وتخلخلات متتابعة . ومع ذلك ، فإذا كان $L_A = L_B$ ، فإن جزئى التضاعف الأصلي سوف يتقابلان دائما عند D . وهذا صحيح أيضا بالنسبة لجزئى كل تخلخل . ومن ثم تتكون عند النقطة D تضاعفات وتخلخلات مماثلة تماما للتضاعفات والتخلخلات الأصلية عند C ، وعليه فإن الصوت يكون جهيرا . وهذا موضح فى اشكل ١٥ - ٩ حيث رسم الضغط فى كل من الموجتين A ، B عند النقطة D كدالة للزمن ، ثم جمع هذان الضغطان لنحصل على الضغط الكلى عند النقطة D كدالة للزمن .

من ناحية أخرى ، لنفرض أن طول الجزء A من الأنبوبة أكبر قليلا من طول الجزء B . عندئذ سيصل نصف التضاعف الذى يتحرك فى A إلى النقطة D متأخرا قليلا عن نصف التضاعف الذى يتحرك فى الجزء B ، لأن المسافة التى يجب أن يقطعها



شكل (١٥ - ٩)
قد تقوى الموجتان A ، B كل
منهما الاخرى . ويعتمد ذلك
على فرق الطور بينهما .

أكبر . فإذا كان L_A أكبر من L_B بمقدار نصف الطول الموجي ، فإن الموجة A ستكون متأخرة عن الموجة B بمقدار نصف الطول الموجي عندما يلتقيان عند النقطة D . وعليه فإن تضاعفا من الموجة A سوف يلتقي مع تخلخل من الموجة B عند النقطة D . وحيث أن التضاعط يؤدي إلى زيادة الضغط عند النقطة D ، بينما يؤدي التخلخل إلى نقص الضغط عند النقطة D ، فإن الموجتين سوف تلاشي كل منهما الأخرى ويظل الضغط دون تغير . ونتيجة لذلك لن يسمع أى صوت عند النقطة D ، وهذا موضح في الشكل ١٥ - ٩ ب .

عندما تكون موجة معينة متأخرة عن موجة أخرى بمقدار نصف الطول الموجي ، يقال في هذه الحالة أن الموجتين متفاوتتي الطور بمقدار نصف الطول الموجي ، أو 180° ، أحدهما عن الأخرى . وهذا الاصطلاح ، 180° ، مبنى على أساس أن الاهتزاز يماثل في كثير من الوجوه جسيما يتحرك في دائرة كما وضعنا في الفصل الثالث عشر . وعليه فإن الاهتزازة الكاملة تكافئ دورة كاملة واحدة حول الدائرة ، أى 360° ، ومن ثم فإن تأخيرا قدره $\frac{1}{2}\lambda$ يكافئ 180° . بالمثل 90° تكافئ $\frac{1}{4}\lambda$ وهكذا .

والآن ، عندما يزداد L_A أكثر من ذلك بتحريك الأنبوبة A إلى أعلى ، سوف يزداد بالتالي تأخر الموجة A عن الموجة B . وعندما يصبح L_A أكبر من L_B بطول موجي كامل واحد ، فإن قمة من الموجة A سوف تصل إلى D في نفس اللحظة مع قمة من الموجة B . وبالرغم من أن هاتين القمتين لم تبدأ سويا من النقطة C ، فإن قمة الموجة A ستصل قبل قمة الموجة B بتضاعف كامل ، ولكن هذا ليس هاما عندما تصل القمتان إلى D . ومرة ثانية ستظهر الموجة كما في الشكل ١٥ - ٩ أ ، وعليه فإن شدة الصوت عند D ستعود إلى قيمتها الأصلية .

بالمثل ، إذا ازداد L_A حتى أصبح أكبر من L_B بمقدار $1\frac{1}{2}\lambda$ ، فإن الحالة الميئة في الشكل ١٥ - ٩ ب سوف تحدث ثانية ، ولن يسمع الصوت عند D . علاوة على ذلك من الواضح ان الصوت لن يسمع عند D متى كان $L_A = L_B + (n + \frac{1}{2})\lambda$ ، حيث n أى عدد صحيح أو صفر . وعندما تلاشي الموجتان كل منهما الأخرى تماما بهذه الطريقة ، يقال أن هناك تداخلا اتلافيا كاملا . وواضح أيضا أن تقوية كل من الموجتين للأخرى ، أى التداخل البناء ، تحدث إذا كان $L_A = L_B + n\lambda$ ، حيث n أى عدد صحيح أو صفر . وبالطبع فإن هذين النوعين من التداخل يحدثان أيضا إذا كان L_B أكبر من L_A .

شروط التداخل
الانحلال والبناء

ليس من الضروري أن يكون لدينا مجموعة انابيب لكى يحدث التداخل ، فكل ما نحتاجه هو الحصول على موجتين متماثلتين تماما فى التردد والشكل . وعندما تتحد هاتان الموجتان بعد أن تقطعا مسارين مختلفين فإنهما سوف تتداخلان احدهما مع الأخرى . وسنعطى مثالا آخر للتداخل فى المثال التوضيحي التالى . وسوف نرى مؤخرا فى هذا الكتاب أن تداخل الموجات الضوئية ذو أهمية كبيرة .

مثال توضيحي ١٥ - ٢ : مصدران صوتيان متماثلان A ، B يصدران موجتين متماثلتين تجاه كل منهما الآخر كما هو مبين فى الشكل ١٥ - ١٠ . ضبط المصدران بحيث يعثان بالقمم الموجية فى نفس اللحظة ، وبحيث كان الطول الموجى لكل من الموجتين $\lambda = 70 \text{ cm}$. وقد وجد أن الصوت يكون جهيرا فى منتصف المسافة بينهما ، أى عند النقطة P . وقد لوحظ كذلك أننا إذا تحركنا من P تجاه المصدر B ، فإن شدة الصوت تقل إلى الصفر تقريبا عند النقطة Q ، ثم تزداد ثانية عندما نتحرك فى نفس الاتجاه مبتعدين عن Q . ما هو البعد بين النقطتين P ، Q ؟

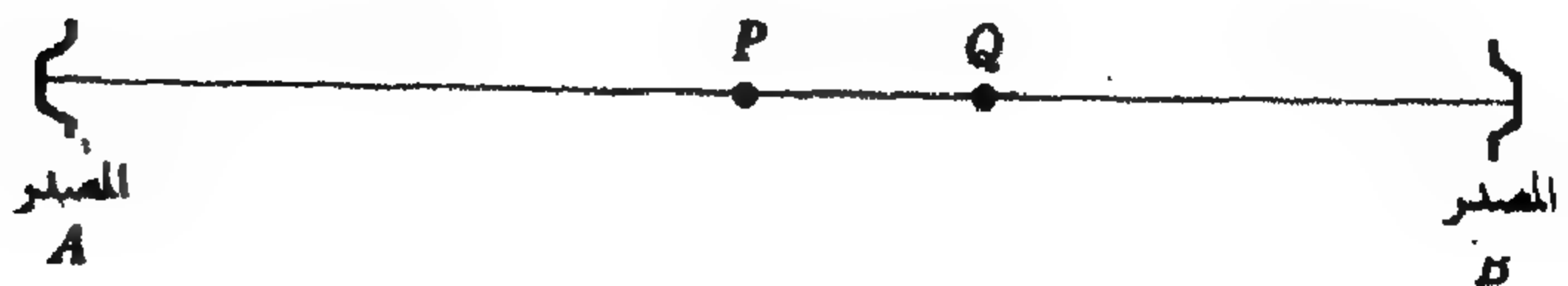
طريقة الحل . من السهل أن نفسر لماذا يكون الصوت قويا عند P ، والسبب فى ذلك هو أن هذه النقطة تقع على نفس البعد من المصدرين ، ولذلك تصل القمم من A و B إلى هذه النقطة فى نفس اللحظة . أى أن P هى نقطة تداخل بناء .

من الواضح أيضا أن الموجتين الآتيتين من المصدرين تلاشى كل منهما الأخرى عند Q . وهذا يحدث عندما تكون المسافة بين P ، Q مساوية لربع الطول الموجى ، أى عندما يكون $PQ = \lambda/4$. وفى هذه الحالة يجب أن تقطع الموجة الصادرة من A مسافة قدرها $\lambda/4$ بعد P ، بينما يجب أن تقطع الموجة الصادرة من B مسافة أقل من المسافة التى تقطعها لتصل إلى النقطة P بمقدار $\lambda/4$. نتيجة لذلك تصل الموجة الآتية من B إلى النقطة Q قبل الموجة الآتية من A بمقدار $\lambda/4 + \lambda/4 = \lambda/2$. وعليه فعند النقطة Q تلتقى قمة B مع قرار من A . إذن ، تلاشى كل من الموجتين الأخرى عند Q ، ولذلك يسمع صوت ضعيف جدا فى هذه النقطة .

نستنتج من ذلك أن المسافة بين النقطة بين النقطتين P ، Q هى $\lambda/4$. وحيث أن $\lambda = 70 \text{ cm}$. إذن $PQ = 17.5 \text{ cm}$.

شكل (١٥ - ١٠)

يسمع صوت قوى عند النقطة A ، بينما يكون الصوت ضعيفا جدا عند Q . اشرح سبب ذلك .

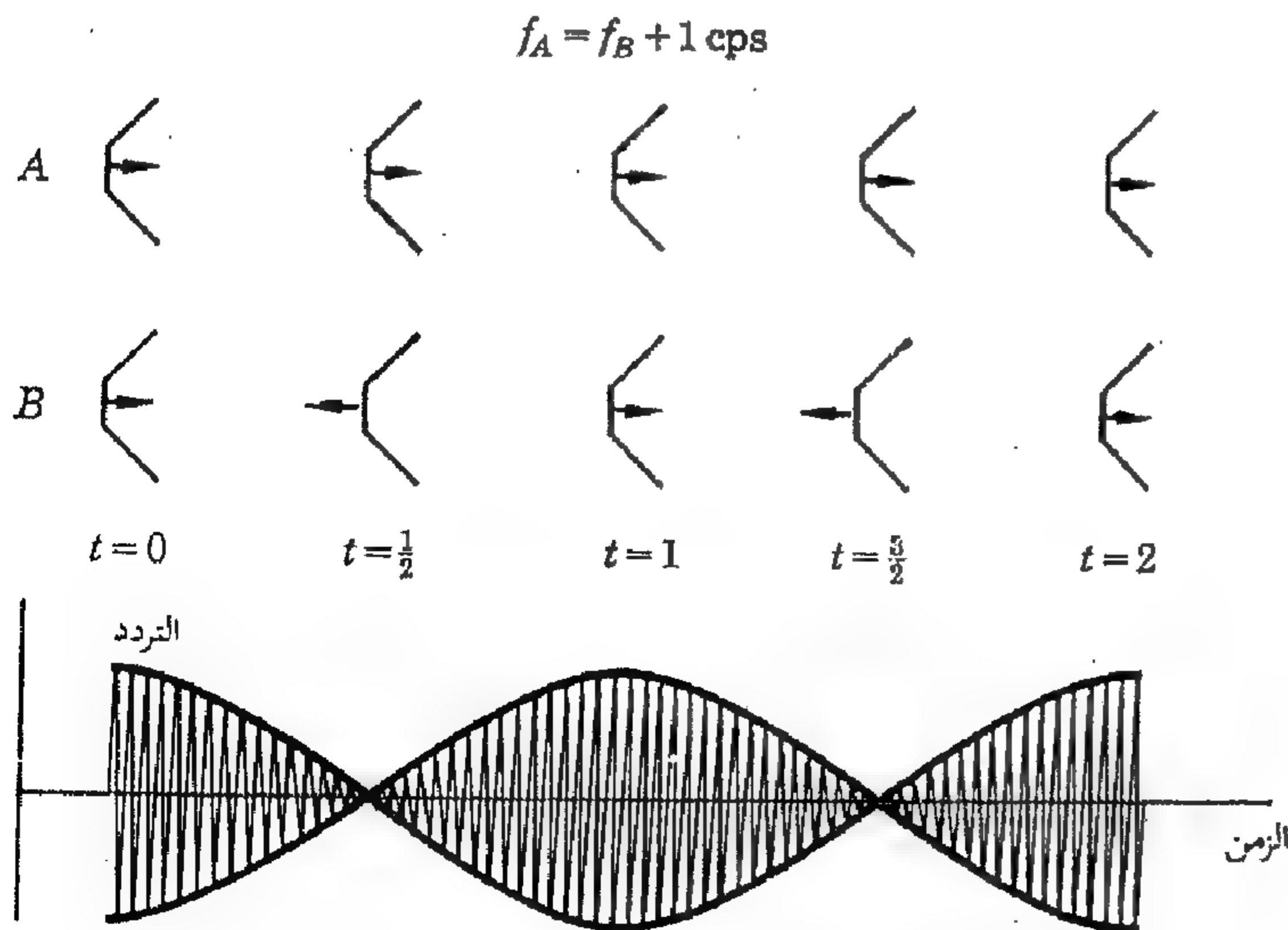


١٥ - ٨ الضربات

تضبط أوتار البيانو بمقارنة النغمات الصادرة منها بنغمات شوك رنانة قياسية معلومة التردد . وعندما يقوم الموسيقيون بضبط أحد أوتار البيانو فإنهم لا ينصتون ببساطة إلى نغمة الوتر ليروا ما إذا كانت مماثلة لنغمة الشوكة الرنانة المستخدمة في المقارنة ، بل يستخدمون طريقة أكثر دقة للحكم على مدى ضبط الوتر ، وهي أن ينصتوا إلى الضربات بين صوتي الوتر والشوكة الرنانة . وهذه طريقة دقيقة جدا للحصول على اتفاق في التردد بين الجسمين المهترئين وتستخدم على نطاق واسع لهذا الغرض . وسنشرح الآن ظاهرة الضربات بين الصوتين الصادرين من جسمين مهترئين متناغمين تقريبا .

لنفرض أن جسمين مهترئين A ، B - كالمجهارين المبينين في الشكل ١٥ - ١١ مثلا - يهتران بترددين يختلف أحدهما عن الآخر اختلافا طفيفا . اعتبر ما يحدث إذا كان المصدر A يهتز بتردد قدره 1000 cps ، بينما يهتز المصدر B بتردد قدره $f = 999 \text{ cps}$. وسنفرض أيضا أن المجهارين متفقا الطور في اللحظة $t = 0$. أى أنهما يبعثان تضاعطين في هذه اللحظة ، كما هو مبين في الشكل . فإذا كانت الأذن تقع على نفس المسافة من كل من المجهارين فإن التضاعطين سوف يصلان إلى الأذن في نفس اللحظة ، ولذلك فإنها تسمع تضاعطا كبيرا .

وبمرور الزمن سوف يبدأ المجهار B ، الذى يهتز بتردد أصغر قليلا من المجهار A ، فى التأخر عن A ، فبعد $\frac{1}{2} \text{ s}$ سيكون المجهار A قد اهتز 500.00 مرة ، وبذلك فإنه سوف يبعث تضاعطا في هذه اللحظة ، كما هو مبين في الشكل ١٥ - ١١ . أما



شكل (١٥ - ١١)
تحدث الضربات عند اهتزاز
مصدرين متشابهين بترددين
مختلفين اختلافا صغيرا .

المجهر B فسيكون قد اهتز 499.50 مرة فقط ، أى أنه سيكون متأخرا عن المجهر A بمقدار نصف دورة تماما ، ولذلك فإنه سوف يبعث تخلخلا في هذه اللحظة كما هو مبين . وعليه فإن تضاعطا من A وتخلخلا من B سوف يصلان إلى الأذن في نفس اللحظة . ونتيجة لذلك سوف تلاشى كل من الموجتين الأخرى تماما ، ومن ثم فلن يسمع أى صوت في هذه اللحظة .

وباستمرار الزمن في المرور يستمر تأخر المجهر B عن A . وبعد 1 s سيكون B قد اهتز 999 مرة تماما ، بينما سيكون A قد اهتز 1000 مرة تماما . أى أن المصدر B سيكون متأخرا عن المصدر A بمقدار دورة واحدة كاملة . ومن ثم فإن كلا منهما سوف يبعث تضاعطا في هذه اللحظة ، ولذلك يصبح الصوت قويا مرة أخرى .

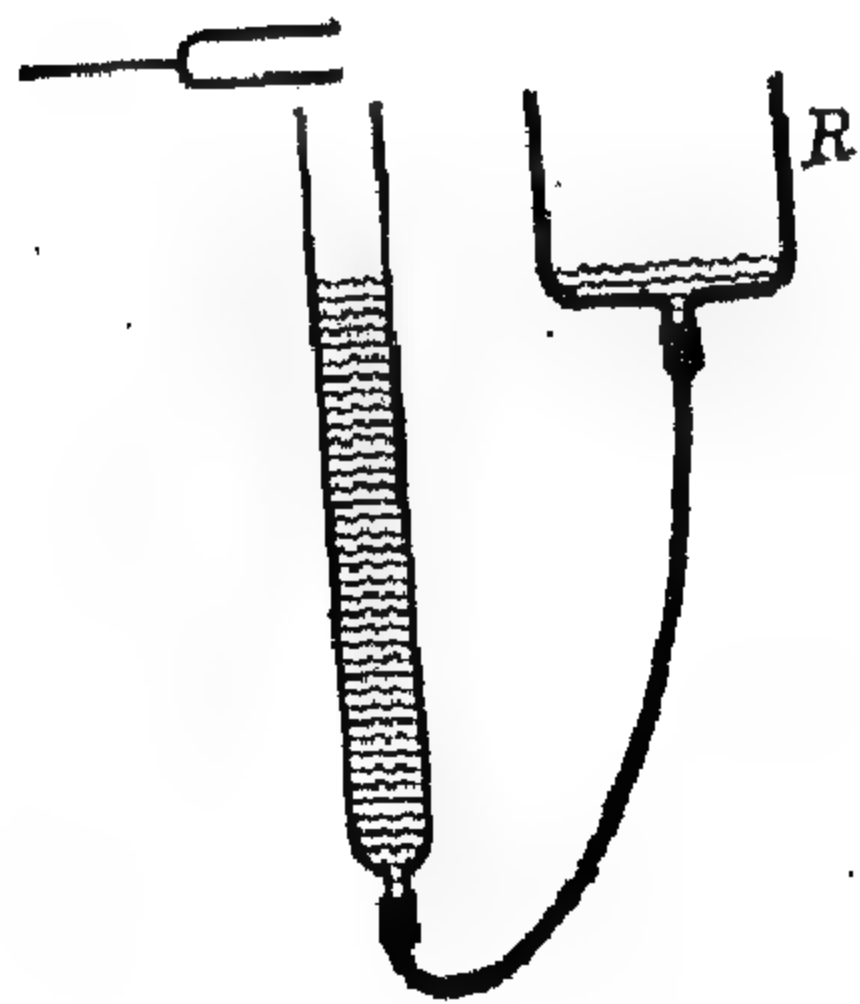
وتتكرر هذه العملية كما هو مبين في الشكل ١٥ - ١١ . ففي اللحظات $t=0,1,2,3 \dots \text{etc s}$ يكون المصدران متفقى الطور وسمع صوت قوى . أما في اللحظات $t=\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2} \dots \text{etc s}$ فلن يسمع أى صوت لأن المصدرين سيكونان متفاوئى الطور بمقدار 180° . ومن ثم فإن الأذن سوف تسمع سلسلة من النبضات الصوتية ، أو الضربات ، مرة واحدة في كل ثانية كما هو موضح في الرسم البياني الذى يمثل العلاقة بين شدة الصوت والزمن في الشكل ١٥ - ١١ .

لاحظ أن الترددين يختلفان أحدهما عن الآخر بمقدار 1 cps ، ولذلك تسمع ضربة واحدة في كل ثانية في هذه الحالة . ويمكنك اجراء التحليل السابق بالنسبة لحالة يختلف فيها الترددان بمقدار 3 cps ، مثلا . وسوف ترى عندئذ أن عدد الضربات التى تحدث في الثانية هو 3 تماما . وفي الحقيقة فإن عدد الضربات في الثانية يساوى الفرق بين ترددي المصدرين . وعند ضبط وتر البيانو يحاول الموسيقى أن يضبط شد الوتر حتى يصبح الفارق الزمنى بين ضربات الصوت الصادر من وتر البيانو والصوت الصادر من الشوكة الرنانة كبيرا جدا .

تحدث ظاهرة الضربات في أى نوع من الاهتزاز يكون ناتجا من تراكب اهتزازين منبعثين من مصدرين مختلفين في التردد . ولهذا يمكن استخدام هذه الظاهرة لمقارنة ترددات الاهتزازات الأخرى غير الاهتزازات الصوتية . وقد رأينا هنا أن هذه الطريقة دقيقة جدا لمقارنة الترددات .

١٥ - ٩ أنابيب الارغن والأعمدة الهوائية المهتزة

إذا وضعت شوكة رنانة مهتزة بالقرب من فوهة أنبوبة زجاجية مملوءة جزئيا بالماء ، فإن الصوت الصادر من الشوكة الرنانة يمكن أن يكبر بدرجة كبيرة تحت شروط معينة . ولتفسير هذه الظاهرة اعتبر التجربة الموضحة في الشكل ١٥ - ١٢ . توضع



شكل (١٥ - ١٢)
يحدث الرنين إذا كان مستوى
الماء في الأنبوبة في الوضع
الصحيح .


الشوكة الرنانة المهتزة بالقرب من فوهة الانبوبة الزجاجية كما هو مبين بالشكل . فإذا رفع الخزان R إلى أعلى فإن مستوى سطح الماء سوف يرتفع في الانبوبة الزجاجية ، وعند ارتفاع معين لسطح الماء في الانبوبة سيسمع رنين قوى في الهواء الموجود بالانبوبة استجابة للصوت الصادر من الشوكة الرنانة . وفي الحقيقة فإن الرنين يحدث عادة عند ارتفاعات مختلفة لعمود الهواء .


هذه الحالة تشبه حالة الوتر المهتز في كثير من الوجوه . ذلك أن الموجة الصوتية التي تتحرك في العمود الهوائي داخل الأنبوبة (أو في الوتر) سوف تنعكس عند وصولها إلى نهاية العمود الهوائي ثم تسير في الاتجاه المعاكس لتصل إلى موضع المصدر المهتز حيث تنعكس مرة أخرى . فإذا كان طول العمود الهوائي (أو الوتر) مناسباً ، فإن المصدر سوف يقوى الموجة المنعكسة عند بدء تحركها إلى أسفل في الانبوبة مرة ثانية . ومن ثم فإن المصدر سوف يقوى الموجة باستمرار بنفس الطريقة التي ترتفع بها الأرجوحة إلى ارتفاع كبير تحت تأثير سلسلة من الدفعات الصغيرة . وقد ناقشنا الفكرة العامة للرنين بالتفصيل في الفصل الثالث عشر ، وسنقوم الآن بتطبيق النتائج التي توصلنا إليها آنذاك على حالة العمود الهوائي المهتز .


شكل (١٥ - ١٣)
بعض أنماط بسيطة للاهتزاز
الرنيني في أنبوبة مغلقة عند
أحد طرفيها .


تتكون في الانبوبة المبينة في الشكل ١٥ - ١٢ عقدة عند الطرف المغلق للعمود الهوائي وبطن بالقرب من الطرف المفتوح له . هذا لأن جزيئات الهواء لا يمكنها أن تتحرك عند الطرف المغلق للعمود الهوائي لأن الماء يمنعها من الحركة إلى أسفل . أما عند الطرف المفتوح فإن الجزيئات تستطيع أن تتحرك بسهولة إلى الخارج . ومن ثم فإن سعة الحركة الاهتزازية تصل إلى أقصى قيمة عند هذه النقطة ، أي أن هذه النقطة عبارة عن بطن* .

نرى من ذلك أن رنين الانبوبة يمكن أن يحدث فقط إذا كان للموجات عقدة عند طرفها المغلق وبطن عند طرفها المفتوح ، ويوضح الشكل ١٥ - ١٣ رسماً تخطيطياً لبعض هذه الموجات . تذكر أن المسافة بين عقدتين متتاليتين أو بطنين تساوي $\lambda/2$ ، إذن المسافة بين العقدة والبطن المجاور تساوي $\lambda/4$. فإذا رمزنا لطول الانبوبة بالرمز L ، فإن طول الانبوبة في الشكل ١٥ - ١٣ هو المسافة بين العقدة والبطن المجاور ، أي أن $L = \lambda/4$. أما في الجزء ب فإن طول الانبوبة يساوي ثلاثة أضعاف المسافة بين العقدة والبطن المجاور ، أي أن $L = 3(\lambda/4)$ وهكذا .

(أ) 
 $L = \lambda/4 \quad f_1 = v/4L$

(ب) 
 $L = 3(\lambda/4) \quad f_2 = 3(v/4L)$

(ج) 
 $L = 5(\lambda/4) \quad f_3 = 5(v/4L)$

(د) 
 $L = 7(\lambda/4) \quad f_4 = 7(v/4L)$

* البطن لا يوجد عند طرف الأنبوبة تماماً ، ومع ذلك فإن هذا التعقيد يمكن إهماله عادة إذا كان نصف قطر الأنبوبة اصغر كثيراً من λ .

ويمكن حساب تردد الرنين في كل من الحالات المبينة في الشكل ١٥ - ١٣ باستخدام حقيقة أن $f = v/\lambda$. وبالتعويض في هذه المعادلة عن λ بدلالة L كما هو مبين في الشكل ١٥ - ١٣ يمكن حساب تردد الرنين في كل حالة بسهولة. لاحظ أن النغمة التوافقية الأولى f_2 تساوي $3f_1$ ، وأن النغمة التوافقية الثانية f_3 تساوي $5f_1$ ، وهكذا. وفي المصطلحات التي تستخدم عادة يسمى التردد $2f_1$ التوافقية الثانية، ويسمى التردد $3f_1$ التوافقية الثالثة... الخ. وفي هذه الحالة يحدث الرنين في الأنبوبة استجابة لترددات التوافقية الفردية فقط. وحيث أن تردد الشوكة الرنانة يكون معلوما عادة، فمن الممكن إذن استخدام ظاهرة الرنين في أنبوبة كالمبين في الشكل ١٥ - ١٢ لقياس سرعة الصوت v .

تشبه أنابيب الأرغن الأنبوبة السابق ذكرها في وجوه كثيرة. غير أن اهتزاز العمود الهوائي في أنبوبة الأرغن يتم بالنفخ في تجويف ذي شكل معين موجود عند أحد طرفي الأنبوبة. ويعتبر عمل الصفارة الموجودة في الأنبوبة معقدا جدا، وسنكتفى بأن نقول أن عملية النفخ تنتج أنواعا كثيرة من الاهتزازات. وتهتز الأنبوبة رنينيا استجابة لأحد الاهتزازات المناسبة التي تولدها الصفارة.


يحدث الرنين في أنابيب الأرغن المغلقة بنفس الطريقة التي يحدث بها الرنين في الأنبوبة الموضحة في الشكل ١٥ - ١٣. وكما سبق أن وضحنا، لا بد أن يتكون بطن بالقرب من الطرف المفتوح حيث توجد الصفارة، وعقدة عند الطرف المغلق، وتكون الترددات الرنينية كما هو موضح في الشكل ١٥ - ١٣. ويمكن الحصول على نغمتين في أنبوبة أرغن واحدة في ذات الوقت باستثارة رنينين في نفس الوقت. وفي هذه الحالة يحدث تغير كبير في نوع الصوت، ولكن هذا الصوت يسمع كنغمة واحدة.


وفي حالة أنابيب الأرغن المفتوحة يجب أن تتكون عقدتان بالقرب من طرفي الأنبوبة. ويمكن الحصول على أنماط وترددات الرنين بطريقة مشابهة لما اتبعناه في الحصول عليهما في حالة الأنبوبة المغلقة من أحد طرفيها والموضحة في الشكل ١٥ - ١٣. وفي هذه الحالة سيكون الموقف كما هو مبين في الشكل ١٥ - ١٤. ويلاحظ في هذه الحالة أن جميع التوافقيات موجودة. فالنغمة التوافقية الأولى هي $2f_1$ والنغمة التوافقية الثانية هي $3f_1$ ، وهكذا.


١٥ - ١٠ السلم الموسيقي والتركيبات التوافقية (أو الهارمونية)


تسمى النسبة بين ترددي نغمتين بالمسافة الموسيقية. ويعبر عن هذه المسافة عادة في صورة نسبة بين التردد الأكبر والتردد الأصغر، بحيث تكون المسافة عددا أكبر من الوحدة. من هذا التعريف نجد أن المسافة الموسيقية من 800 cps إلى

شكل (١٥ - ١٤)
بعض أنماط بسيطة للاهتزاز
الرنيني في أنبوبة مفتوحة من
طرفيها.

(أ) 
 $L = \lambda/2 \quad f_1 = v/2L$

(ب) 
 $L = 2(\lambda/2) \quad f_2 = 2(v/2L)$

(ج) 
 $L = 3(\lambda/2) \quad f_3 = 3(v/2L)$

(د) 
 $L = 4(\lambda/2) \quad f_4 = 4(v/2L)$

600 cps ، وهى $\frac{4}{3}$ ، تساوى المسافة الموسيقية من 1200 cps إلى 900 cps وهى $\frac{4}{3}$ أيضا .

وقد تبين بالخبرة أن معظم الناس يحسون بتوافق وانسجام النغمات إذا كانت مسافاتهما الموسيقية عبارة عن نسبة بين عددين صحيحين صغيرين ، فمثلا ، المسافة الموسيقية بين النغمتين 1200 cps و 600 cps هى $\frac{2}{1}$ ، وهذه المسافة تسمى بالجواب . وحيث أن المسافة بين هاتين النغمتين هى النسبة بين عددين صحيحين صغيرين ، فإنهما متوافقتين تماما . ومن ناحية أخرى ، المسافة الموسيقية بين النغمتين 300 cps و 150 cps تساوى $\frac{11}{5}$ ، ولذلك فإنهما ليستا متوافقتين بنفس الدرجة كالتركيبة $\frac{2}{1}$ المذكورة سابقا .

يتكون السلم الموسيقى الطبيعي الكبير من المجموعة الآتية من المسافات الموسيقية :

do $\frac{9}{8}$ re $\frac{10}{9}$ mi $\frac{16}{15}$ fa $\frac{9}{8}$ sol $\frac{10}{9}$ la $\frac{9}{8}$ ti $\frac{16}{15}$ do'

ومن الواضح أنه إذا عزفت النغمتان « دو » و « رى » سويا سنحصل على نشار لأن المسافة الموسيقية هى $\frac{9}{8}$. وهى النسبة بين عددين كبيرين تماما . ومع ذلك فإن التركيبات الأخرى من هاتين النغمتين أكثر توافقا . ويمكننا أن نرى ذلك بأن نحدد ترددات معينة لهذه النغمات . فإذا كان تردد النغمة « دو » هو 264 cps ، فإن نغمات السلم الموسيقى السابق ستكون كمايلي :

do	re	mi	fa	sol	la	ti	do'
264	297	330	352	396	440	495	528

ومن الواضح أن النسبة $\frac{330}{264}$ هى $\frac{5}{4}$ ، وعليه فإن النغمتين « دو » و « مى » متوافقتان بدرجة جيدة . ومع ذلك فإن « دو » و « فا » ، حيث النسبة بينهما $\frac{4}{3}$ ، أكثر توافقا ، كذلك فإن النغمتين « دو » و « صول » ، حيث النسبة بينهما $\frac{3}{2}$ ، أكثر توافقا من الحالتين السابقتين ، ولذلك فإنهما أكثر اطرابا . ويمكنك أن تحدد بنفسك النغمات التى تتوافق مع بعضها البعض أكثر من الأخرى . ومن المفضل أن تختبر صحة استنتاجاتك باستعمال البيانو . وقد اختيرت هذه الترددات بحيث تكون النغمة « دو » هى الاصبع C المتوسط ، وتحتل النغمات الأخرى المواضع D ، E ، F ، G ، A ، B ، C' على الترتيب .

وبالرغم من هذه التعميمات المتعلقة بالاصوات السارة وغير السارة ، يجب أن نعترف بأن احساس الشخص بالموسيقى يعتمد على خلفيته الثقافية . ويعطينا تاريخ

الموسيقى أمثلة مثيرة عن مدى تغير الذوق الموسيقي عند البشر . ولن نحتاج أن نفحص في اعماق التاريخ إلى أبعد من القرن الحالى لنرى أن الأذواق الموسيقية تتغير من زمن إلى آخر . فكثير من المؤلفين الموسيقيين الذين تلاقى أعمالهم اليوم نجاحا كبيرا قد ذاقوا مرارة الفشل عندما عزفت أعمالهم لأول مرة إذ كانت موسيقاهم تعتبر مزعجة جدا . ونحن نعلم من خبراتنا الخاصة أن الجيل السابق ينظر إلى الموسيقى الحديثة على أنها مجموعة غير متألّفة من الأصوات المزعجة والمثيرة للاشمئزاز . وهذا أيضا هو انعكاس حقيقة أن الذوق الموسيقي يتغير باستمرار .

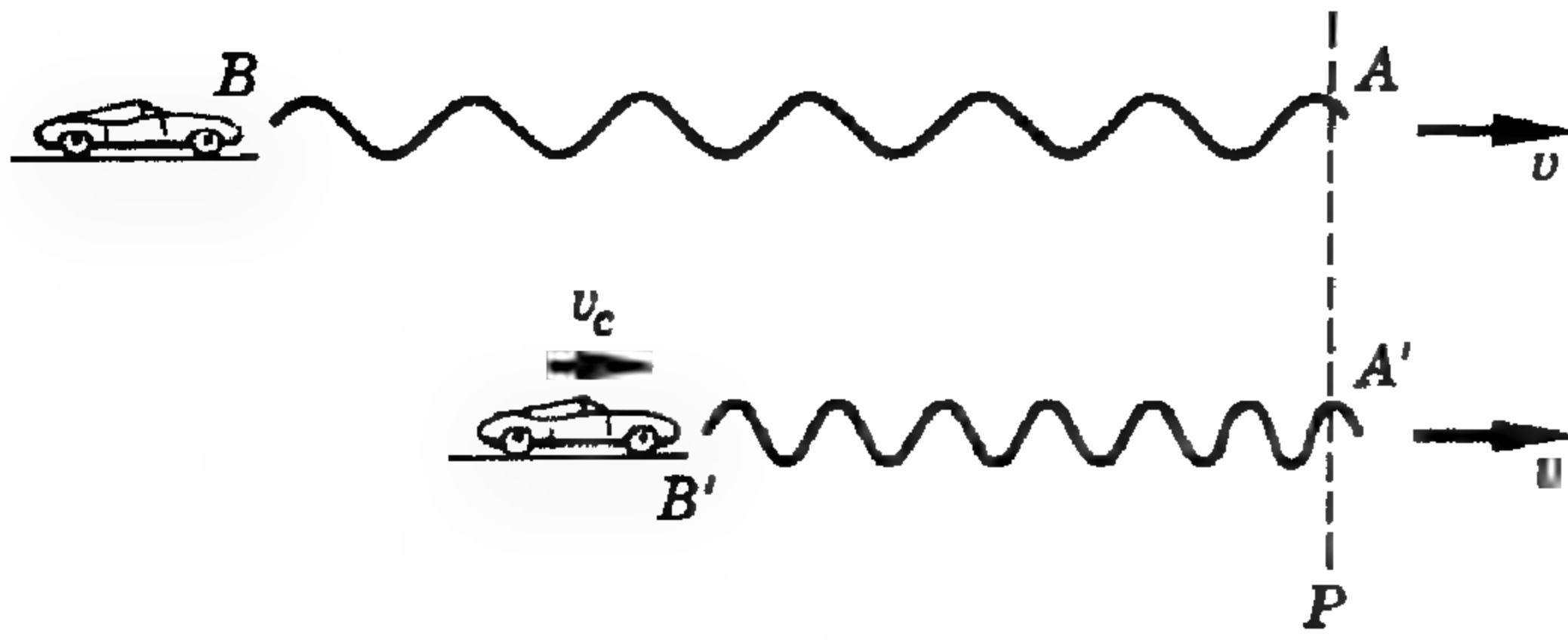
وتتضح إحدى السمات الأخرى للذوق الموسيقي عند مقارنة موسيقى الحضارات المختلفة بعضها ببعض . فمثلا ، تسبب الموسيقى العربية احساسا بالقلق والاستثارة والتهيج لدى معظم الأمريكيين ، ولا ينظرون إليها الا كبدعة عابرة . ذلك أن التركيبات النغمية في الموسيقى العربية تختلف اختلافا تاما عن التركيبات المستخدمة على نطاق واسع في الموسيقى الغربية ، ولذلك فإن هذه الموسيقى تبدو للجاناب متنافرة ورتيبة معا . ولا يخس الانسان الغربى بجمال هذه الموسيقى الا بعد استماع طويل لها وتأمل كبير فيها . ومن الواضح أن الجوانب النفسية للموسيقى أكثر تعقيدا جدا من الموجات الصوتية التى نفهمها جيدا والتي تحمل الموسيقى إلى اذاننا .

١٥ - ١١ ظاهرة دوبلر .

إذا كنت واقفا على جانب طريق تتحرك عليه سيارة سريعة آتية من بعيد مطلقة نفيرها فإنك سوف تلاحظ ظاهرة غريبة . فبالرغم من أن درجة صوت النفير تستمر ثابتة إلى أن تصبح السيارة فى محاذة نقطة المشاهدة تقريبا ، الا أنها سوف تنقص فجأة عندما تمر بك السيارة وتستمر على هذا المستوى الجديد أثناء تباعدها على الطريق . وتسمى الظاهرة التى تحدث فى هذه الحالة ، وكذلك فى حالات فيزيائية اخرى ، ظاهرة دوبلر .

فإذا كنت واقفا فى اذنك ، فإن ظاهرة دوبلر تعنى أن تردد الصوت الذى يصل إلى طبلة الأذن يكون أعلى عندما تتحرك السيارة مقتربة منك عن قيمته إذا كانت السيارة تتحرك مبتعدة عنك . وهذا يعنى ، بأسلوب آخر ، أن عدد القمم الموجية التى تصل إلى الأذن يكون أكبر إذا كانت السيارة تتحرك نحوك عن قيمتها إذا كانت السيارة تتحرك مبتعدة عنك . وسوف نثبت الآن أن هذا معقول وأن من الممكن إيجاد معادلة لهذه الظاهرة بسهولة .

شكل (١٥ - ١٥)
تنشأ ظاهرة دوبلر إذا كان
المصدر الصوتي متحركاً .



ويوضح الشكل ١٥ - ١٥ هذا الموقف الفيزيائي ، ويمثل الجزء العلوي من الشكل سيارة ساكنة والموجة الصوتية المنطلقة من النفير والتي تتحرك مبتعدة عنها . لنفرض أن السيارة الموضحة في الجزء السفلي من الشكل تتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها v_c وأنها تطلق نفيرا مماثلاً للنفير الأول . لنفرض أيضاً أن النفير العلوي قد أطلق القمة الموجية A وأن النفير السفلي قد أطلق القمة الموجية A' في لحظة عبور السيارة السفلي للسيارة العليا تماماً . وحيث أن كلتا القمتين تتحركان إلى اليمين بنفس السرعة v ، وهى سرعة الصوت في الهواء ، فإنهما ستظلان متلازمتين كما هو مبين .

ومع ذلك فإن الموجات المنبعثة من النفير السفلي سوف تنضغط في حيز أصغر . كما هو مبين بالشكل ، نتيجة لحركة السيارة السفلي إلى اليمين . ومن ثم فإن عدد القمم الموجية التي تصل إلى النقطة P في الثانية سيكون أكبر في هذه الحالة مما في حالة السيارة الساكنة العليا . لذلك فإن تردد الصوت المنبعث من نفير السيارة السفلي سيكون أكبر عند P مما لو كانت السيارة ساكنة . لنحسب الآن هذا التغير في التردد .

نظراً لحركة السيارة السفلي إلى اليمين ، لابد أن يقل الطول الموجي للموجة الصوتية المنبعثة من نفيرها بمقدار $v_c \tau$ حيث v_c سرعة السيارة ، τ الزمن الدورى للصوت المنبعث من نفيرها ، وذلك لأن السيارة سوف تتحرك مسافة قدرها $v_c \tau$ في خلال الزمن τ الذى تنطلق فيه القمم الموجية . ونتيجة لذلك تنضغط القمم الموجية المنبعثة في خلال هذا الزمن بنفس المقدار ، أى $v_c \tau$. فإذا كانت λ هى الطول الموجي للصوت المنبعث من السيارة الساكنة ، فإن الطول الموجي للصوت المنبعث من السيارة المتحركة λ' سيكون :

$$\lambda' = \lambda - v_c \tau$$

ويمكن تبسيط هذه المعادلة بالتعويض عن $\lambda = v/f$ ، $\tau = 1/f$ ، حيث v سرعة الصوت في الهواء ، f تردد اهتزاز النفير ، وأيضاً $\lambda' = v/f'$ حيث f' هو تردد الصوت الذى يسمعه شخص موجود عند النقطة P من السيارة المتحركة . وبذلك يمكننا كتابة المعادلة السابقة على الصورة :

$$\frac{v}{f'} = \frac{v}{f} - \frac{v_c}{f}$$

ومنه :

$$(٢ - ١٥) \quad \frac{f'}{f} = \frac{1}{1 - v_c/v}$$

زحزحة دوبلر

حيث v سرعة المصدر الصوتي . ويمكن اعادة صياغة هذه المعادلة في صورة مفيدة إذا كان التغير في التردد $f' - f = \Delta f$ صغيرا . وعندئذ :

$$\frac{\Delta f}{f'} = \frac{v_c}{v} \approx \frac{\Delta f}{f}$$

وبهذا التقريب يمكننا أن نعتبر أن v_c هي سرعة اقتراب المصدر والمُشاهد أحدهما من الآخر . وتنطبق هذه المعادلة إذا كان المصدر الصوتي متحركا والمُشاهد ساكنا ، وكذلك إذا كان المصدر الصوتي ساكنا والمُشاهد متحركا .

نرى من ذلك ، كما هو متوقع ، أنه كلما زادت النسبة v_c/v ، كلما زادت النسبة f'/f أيضا . فإذا كانت السيارة ساكنة ، أى عندما تكون $v_c = 0$ فإن $f' = f$. أما إذا كانت v_c أكبر من الصفر ، فإن تردد الصوت f' سيكون أعلى من تردد النفير f . وكمثال نموذجي ، افترض أن السيارة تتحرك بسرعة قدرها $80 \text{ ft/s} (55 \text{ mi/h})$. إذن ، حيث أن سرعة الصوت تساوى حوالى 1000 ft/s فإن $v_c/v = 0.080$ ، وعليه فإن النسبة بين تردد الصوت وتردد النفير هي :

$$\frac{f'}{f} = \frac{1}{1 - 0.080} = 1.08$$

فإذا كان تردد نفير السيارة هو 500 Hz . فإن تردد صوت النفير المتحرك سيكون 450 Hz .

تنطبق المعادلة (٢ - ١٥) أيضا على الصوت المنبعث من سيارة متباعدة ، بشرط أن تلاحظ أن v_c ستكون عندئذ سالبة ، وفي هذه الحالة ستؤدى حركة السيارة المتباعدة إلى مط الموجة الصوتية بدلا من ضغطها ، وعليه فإن النسبة f'/f ستكون أقل من الوحدة . وإذا طبقت نفس الخطوات المتبعة في إيجاد المعادلة (٢ - ١٥) على السيارة المتباعدة ، لابد أن تراعى استخدام $-v_c$ بدلا من v_c في جميع المعادلات . إذن ، تنطبق المعادلة (٢ - ١٥) على كلتا الحالتين ، بشرط أن تعتبر v_c موجبة إذا كان المصدر الصوتي يتحرك مقتربا من المُشاهد وسالبة إذا كان المصدر الصوتي يتحرك مبتعدا عن المُشاهد .

١٥ - ١٢ الموجات الصدمية ودوى اختراق جدار الصوت

رأينا فى الجزء السابق أن تردد الصوت المسموع يكون أكبر من التردد الحقيقى إذا كان المصدر الصوتى يتحرك مقتربا من المشاهد . وتحدث ظاهرة غريبة عندما تقترب سرعة المصدر الصوتى من سرعة الصوت أو تصبح مساوية لها . وذلك أننا سنجد من المعادلة (١٥ - ٢) أن تردد الصوت 'ر' سيقرب من مالا نهاية فى هذه الحالة . وهذا يعنى ببساطة أن عددا لانهاثيا من القمم الموجية سوف يصل إلى السامع فى وقت قصير جدا . ويمكننا أن نفهم هذا بسهولة بالرجوع مرة ثانية إلى الشكل ١٥ - ١٥ .

لنفرض أن سرعة السيارة المتحركة تساوى سرعة الصوت . عندئذ سوف تنطبق النقطة B' على النقطة A' . ونتيجة لذلك سوف تقع جميع القمم الموجية الموجودة بين A' ، B' فوق بعضها البعض . ولهذا فإن جميع هذه القمم الموجية ، وكذلك المصدر الصوتى نفسه ، سوف تعبر النقطة P فى نفس اللحظة . وعليه فإن طاقة الموجة الصوتية كلها سوف تنضغط فى منطقة صغيرة جدا أمام المصدر الصوتى . وبالتالي سوف تسبب هذه المنطقة المكثفة جدا من الطاقة الصوتية ، أو الموجة الصدمية ، صوتا عاليا جدا عند مرورها بالنقطة P . وهذا هو أساسا مصدر دوى اختراق جدار الصوت الذى يصاحب الطائرات فوق الصوتية .

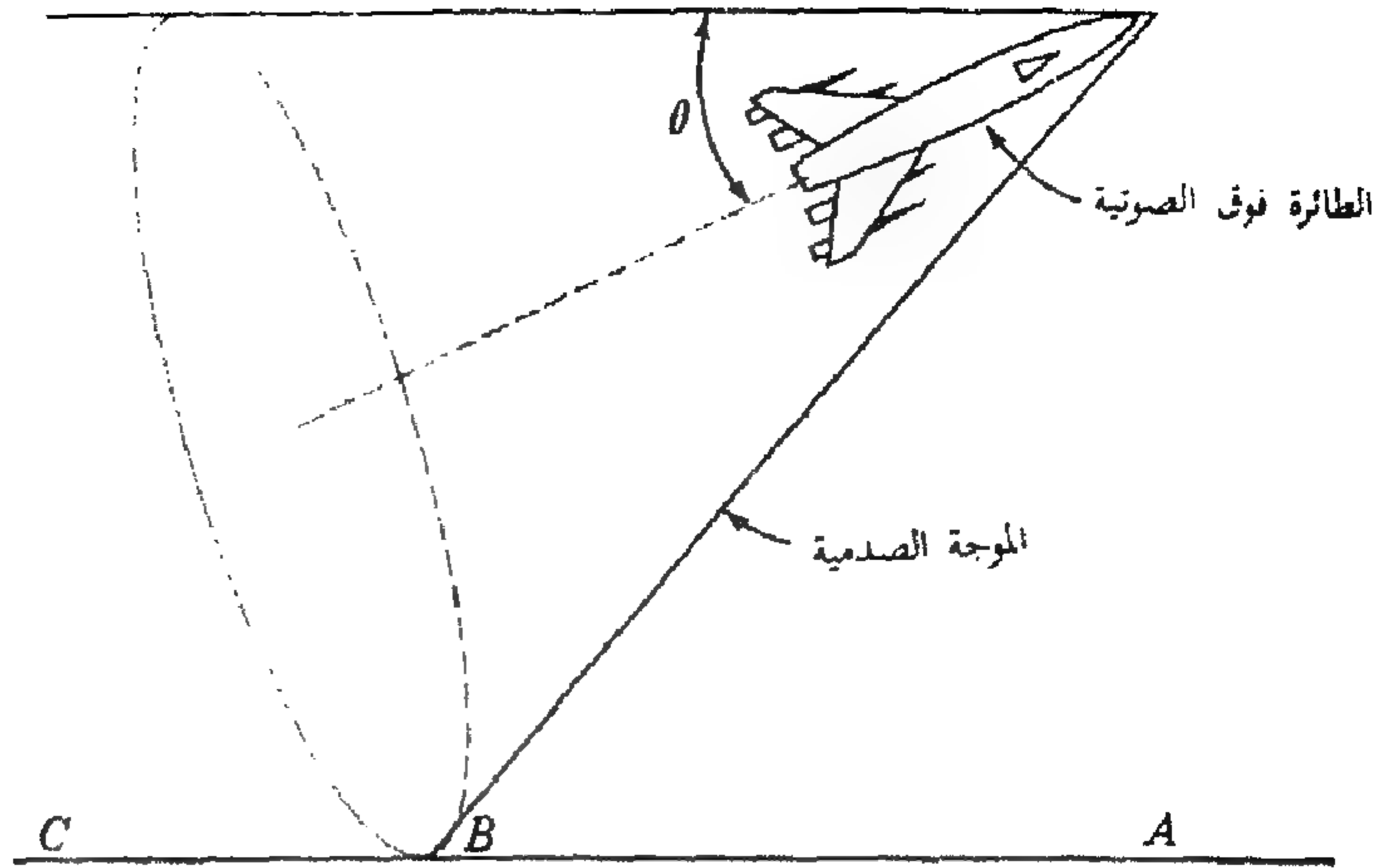
عندما تتحرك طائرة فى الهواء بسرعة قريبة من سرعة الصوت تتراكم الضوضاء والاضطرابات الهوائية الناتجة من حركة الطائرة مكونة الموجة الصدمية ، وهى ببساطة عبارة عن منطقة مكثفة جدا من الطاقة الصوتية كما وضعنا سابقا . ويعتمد الشكل الحقيقى للموجة الصدمية على سرعة الطائرة . ولكنها عموما تغطى سطح مخروط كما هو مبين فى الشكل ١٥ - ١٦ . وتعتمد زاوية المخروط بدورها على النسبة بين سرعة الطائرة v_p وسرعة الصوت v حسب العلاقة التالية :

$$\sin \theta = \frac{v}{v_p}$$

وواضح من هذه المعادلة أن زاوية المخروط تقل عندما تصبح سرعة الطائرة « v_p » أكبر من سرعة الصوت v ، وتسمى النسبة v_p/v عادة العدد الماخى . وعليه فإذا كانت الطائرة تتحرك بسرعة قدرها Mach 2 فإن هذا يعنى أنها تتحرك بسرعة تساوى ضعف سرعة الصوت .

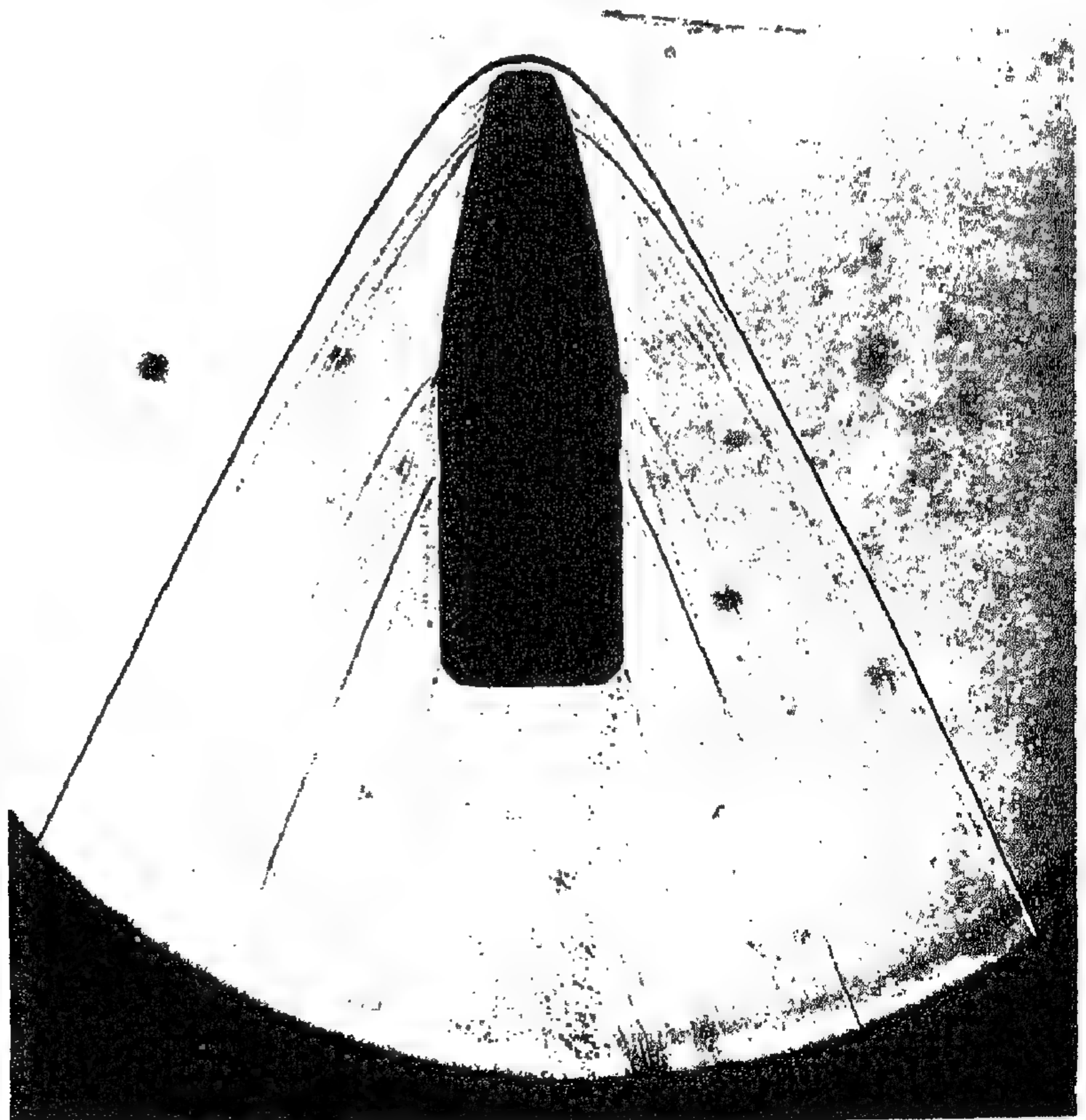
وحيث أن الموجة الصدمية هى منطقة من الطاقة الصوتية المكثفة جدا ، فإنها يمكن أن تسبب تدميرا شديدا عند اصطدامها بشيء ما . فدوى اختراق جدار الصوت المعروف لنا جميعا ما هو الا نتيجة لمرور السطح المخروطى للموجة

شكل (١٥ - ١٦)
اصطدم دوى اختراق جدار
الصوت بالفعل بالنقطة C
ويتحرك الآن تجاه A مارا
بالنقطة B .



الصدمية فوق الأرض . فمثلا ، وواضح من الشكل ١٥ - ١٦ أن دوى اختراق
جدار الصوت قد اصطدام بالنقطة C في لحظة سابقة وأنه يصطدم بالنقطة B في
اللحظة الحالية وأنه سوف يصل حالا إلى النقطة A . ويعتمد التأثير التدميري للموجة
الصدمية بالطبع على شدة هذه الموجة . ويمثل الشكل ١٥ - ١٧ صورة فوتوغرافية
ومبضية للموجة الصدمية التي يسببها مقذوف في الهواء . هل يمكنك أن تثبت أن
سرعة المقذوف تساوى حوالى 2.1 قدر سرعة الصوت في الهواء ؟

شكل (١٥ - ١٧)
الموجات الصدمية التي يسببها
مقذوف منطلق في الهواء .



ملخص

الموجات الصوتية هي موجات تضاغطية في مائع أو جامد . عندما تصطدم الموجات الصوتية ببطلة الأذن تؤدي إلى الاحساس بالسمع . يرسل المصدر الصوتي تضاغطات وتخلخلات في المادة القريبة منه . سرعة الصوت في الهواء عند درجة 0°C تساوي 331 m/s (1086 ft/s) . تزداد سرعة الصوت في الهواء بحوالى 0.60 تقريبا لكل ارتفاع في درجة الحرارة بمقدار 1°C .

شدة الموجة هي القدرة المارة خلال وحدة المساحة المقامة عموديا على اتجاه انتشار الموجة . تقع الاصوات المسموعة في مدى الشدة الذى يمتد من حوالى 10^{-12} W/m^2 إلى حوالى 1 W/m^2 . حيث أن الأذن جهاز كشف لوغاريتمى ، تقاس شدة الصوت عادة على مقياس لوغاريتمى . يرتبط مستوى شدة الصوت بالديسيبل مع شدة الموجة الصوتية بالواط لكل متر مربع I بالكمية $10 \log(I/10^{-12})$.

يستطيع معظم الأشخاص سماع الاصوات التى يقع ترددها بين حوالى 20 Hz وحوالى $20,000 \text{ Hz}$. تسمى الموجات الصوتية التى يزيد ترددها عن $20,000 \text{ Hz}$ بالموجات فوق السمعية . تصل حساسية الأذن العادية إلى أقصى قيمة بالقرب من 3000 Hz .

تتكون معظم الاصوات من خليط من عدة موجات ذات ترددات مختلفة . يختلف نوع الصوت باختلاف مركبات هذا الخليط من الموجات الصوتية . لهذا تعطى الآلات الموسيقية المختلفة ، مثلا ، أصواتا مختلفة بالرغم من أنها تعرف نفس التردد الاساسى .

يمكن أن تتراكب الموجات متساوية التردد لتؤدي إلى ظواهر التداخل . إذا كانت الموجات متفقة الطور فإنها تتداخل تداخلا بناء لتعطى صوتا جهوريا . أما إذا كانت متفاوتة في الطور بمقدار 180° أو π ، فإنها تلاشى بعضها البعض . عندما تتداخل موجتان مختلفتان اختلافا طفيفا في التردد فإنها تؤدي إلى ظاهرة الضربات . عدد الضربات في الثانية يساوى الفرق بين الترددين .

تحدث ظاهرة الرنين في المواسير والأنابيب . تتكون عقدة موجية عند الطرف المغلق وتتكون بطن موجى عند الطرف المفتوح .

قد يتغير تردد الصوت الذى يصل إلى الاذن نتيجة لحركة المصدر مقتربا أو مبتعدا عن المشاهد . تسمى هذه الظاهرة ظاهرة دوبلر . إذا كان المصدر والمشاهد يقتربان احدهما من الآخر فإن تردد الصوت يزداد . وإذا كان يتبعدان احدهما عن الآخر فإن التردد ينخفض .

تحدث الموجات الصدمية عندما تتحرك المصادر الصوتية بسرعة اكبر من سرعة الصوت . تتكون هذه الموجات الصدمية من اضطرابات موجية مكثفة جدا وتحمل كميات كبيرة من الطاقة في منطقة محدودة . عندما تصطدم الموجات الصدمية بمشاهد فإنها تؤدي إلى ما يسمى دوى اختراق جدار الصوت .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

- ١ - شرح ماذا نعنى بالموجة الصوتية وتوضيح لماذا لاينتقل الصوت في الفراغ .
- ٢ - ذكر سرعة الصوت في الهواء عند درجة 0°C وحساب قيمتها عند درجات الحرارة القريبة من درجة حرارة الغرفة .
- ٣ - تعريف شدة الصوت . توضيح لماذا يعتبر مقياس الديسيبل مناسباً للتعبير عن مستوى شدة الصوت . إيجاد مستوى شدة الصوت بالديسيبل بمعلومية شدة الصوت بالواط لكل متر مربع .
- ٤ - تخطيط رسم يبانى مشابه للرسم المعطى في الشكل ١٥ - ٥ وتفسيره بالالفاظ .
- ٥ - شرح مفهوم نوع الصوت وتوضيح لماذا يختلف نوع الصوت عن تردده .
- ٦ - تركيب موجتين متساويتين في التردد والسعة ومختلفتين في الطور للحصول على تداخل بناء وتداخل اتلافي . تطبيق ما فهمته في حل المسائل البسيطة كالمثال التوضيحي ١٥ - ٢ .
- ٧ - استخدام ظاهرة الضربات لإيجاد الفرق في التردد بين مصدرين صوتيين .

- ٨ - إيجاد الترددات الرنينية للصوت في أنابيب معينة .
- ٩ - شرح ماذا نعنى بظاهرة دوبلر وحساب زحزحة التردد التى تلاحظ عند اقتراب المصدر الصوتى .
- ١٠ - شرح كيفية تكون الموجة الصدمية وتوضيح لماذا تؤدي هذه الموجة إلى دوى اختراق جدار الصوت .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

- الموجة الصوتية
- الجهة الموجية
- شدة الصوت
- مستوى شدة الصوت بالديسيبل
- الأذن كجهاز لوجارىتمى
- نوع الصوت
- الموجات فوق السمعية
- متفق الطور ومتفاوت الطور
- فرق طور قدره 0° و 180°
- الضربات
- النغمات التوافقية ضد التوافقيات
- المسافة الموسيقية
- ظاهرة دوبلر
- الموجة الصدمية ودوى اختراق جدار الصوت
- العدد الماخى

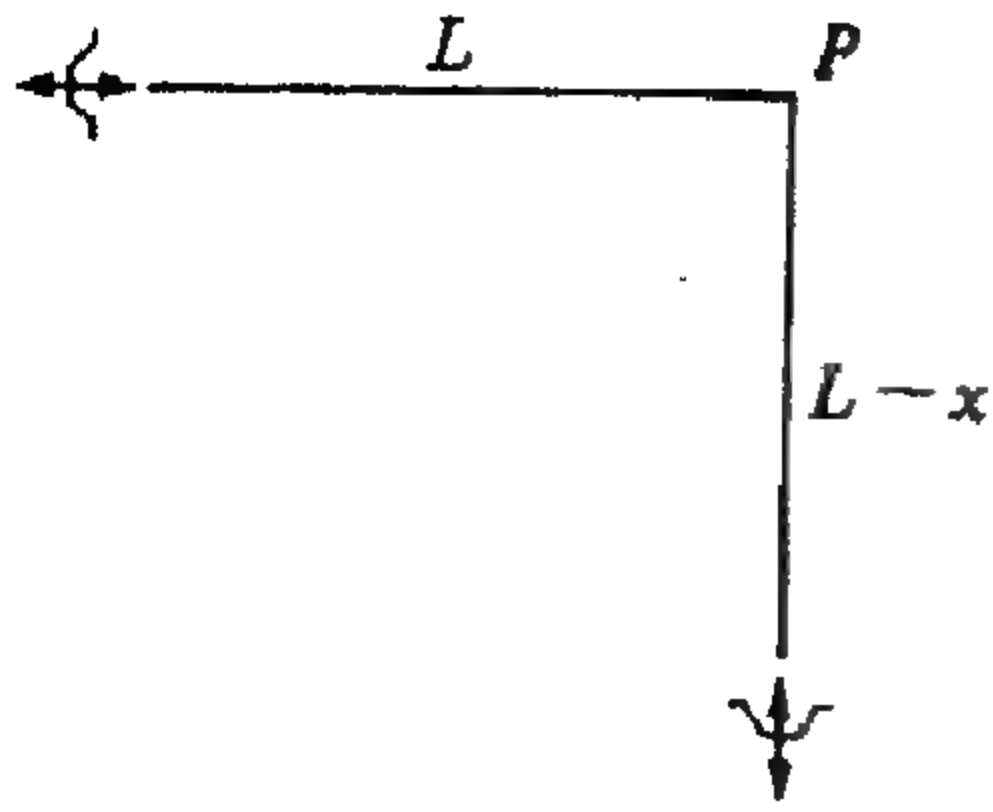
اسئلة وتخمينات

- ١ - صف بوضوح لماذا لايسمع الجرس الذى يدق فى غرفة تفريغ فى الخارج .
- ٢ - هل نتوقع أن يكون تردد الصوت المسموع تحت الماء مساويا لتردد الصوت المسموع فى الهواء إذا كان المصدران متماثلين تماما ؟ اشرح .
- ٣ - عندما يستنشق رجل غليظ الصوت غاز الايدروجين ثم يتكلم فإن صوته يصبح عالى الدرجة . لماذا .
- ٤ - لنفرض أن مجموعة من أنابيب الارغن معلقة بالقرب من ماسورة بخار . هل يؤثر ذلك على عمل الارغن ؟ اشرح .
- ٥ - يمكن عمل سرينة بثقب مجموعة من الفتحات متساوية البعد عن بعضها البعض على دائرة متمركزة مع محور لوح أو قرص معدنى صلب . وعندما تدور هذه الدائرة أثناء اندفاع تيار من الهواء عليها بالقرب من الفتحات تنبعث نغمة شبيهة بالسرينة . اشرح كيف يعطى ذلك احساسا بالصوت للأذن واذكر العوامل التى تؤثر على درجة ونوع النغمة .
- ٦ - يقال أن مغنيا معيناً يمكنه أن يحطم كوباً زجاجياً بأن يغنى نغمة معينة . هل يمكن أن يكون هذا صحيحاً ؟ اشرح .
- ٧ - عندما ينفجر سهم نارى مفرق فى غرفة كبيرة كالجيمنازيوم (صالة الالعاب الرياضية) يستمر الصوت بعض الوقت ثم يتلاشى . اشرح ما يحدث للطاقة الصوتية المنبعثة أثناء الانفجار .

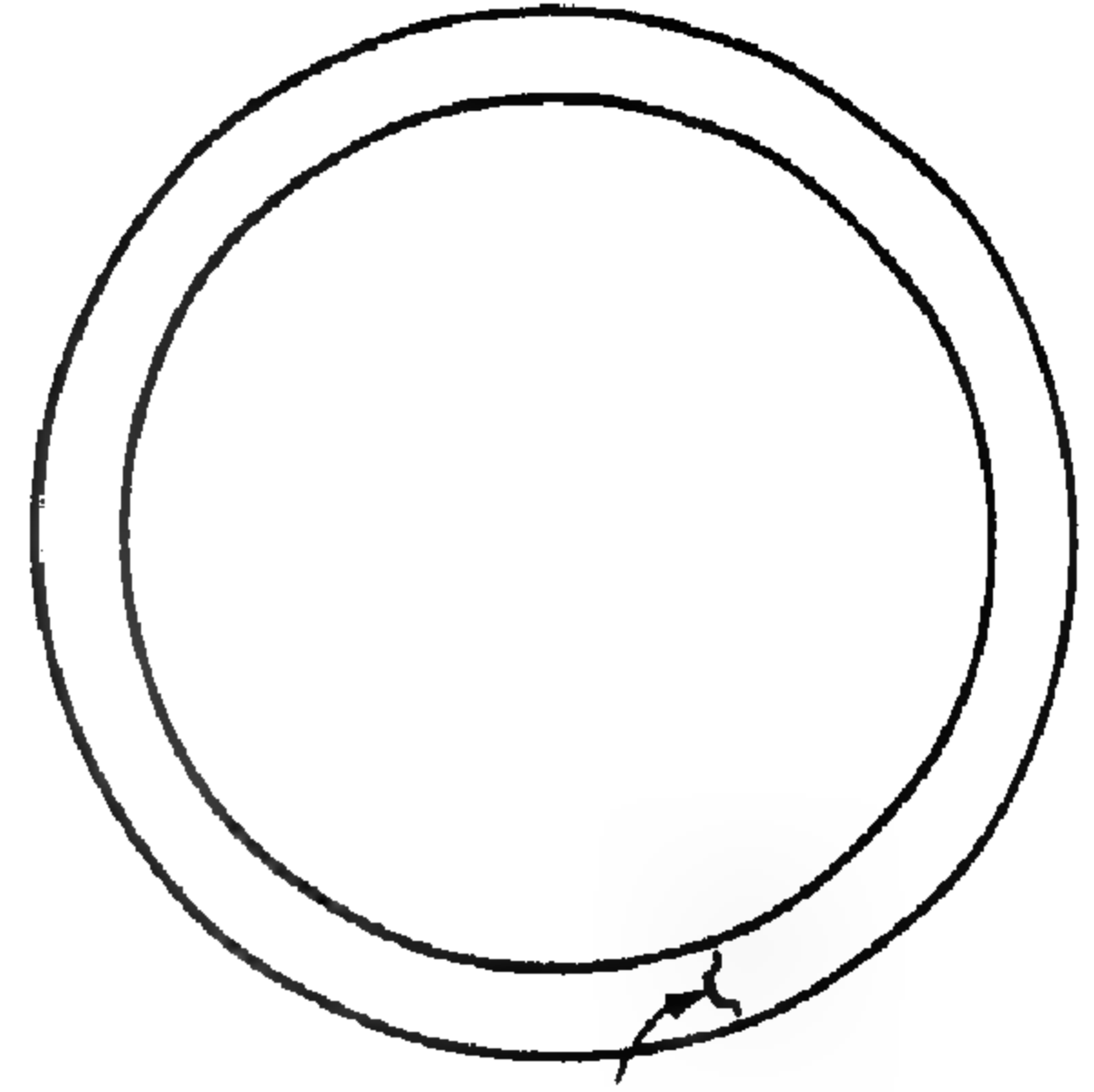
- ٨ - زمن التردد لغرفة هو الزمن اللازم لتلاشي الصوت - نغمة من أنبوبة ارغن مثلا - بعد أن يتوقف المصدر . اشرح لماذا يقل زمن التردد إذا كانت النوافذ مفتوحة . ماهي الوسائل الاخرى التى يمكن استخدامها للتحكم فى زمن التردد ؟
- ٩ - يوجد فى الاسواق جهاز يستخدم الموجات فوق السمعية فى الماء لازالة القاذورات العالقة بالملابس والاشياء الاخرى . اشرح كيف يعمل هذا الجهاز واذكر مزاياه وعيوبه .
- ١٠ - يمكن استخدام زجاجات المشروبات الخفيفة فى اصدار الصوت بالنفخ فى فوهتها بالطريقة المناسبة . قدر الترددات الرنينية للزجاجة . اختبر صحة اجابتك بالاستعانة بالشوك الرنانة أو مذبذب أو مجهر معايرين . (ق)
- ١١ - عند اجراء الابحاث تحت الماء يستخدم السونار عادة « للرؤية » تحت الماء . ويقوم هذا الجهاز بارسال النبضات الصوتية فى الماء وتستقبل بعد ذلك النبضات المنعكسة عند نقطة الارسال . اشرح كيف تستكشف المناطق المجاورة بهذه الطريقة . ماهى أوجه التشابه بين السونار والرادار . وتستخدم الخفافيش نوعا من السونار فى طيرانها فى الكهوف المظلمة . كيف يعمل هذا الجهاز ؟
- ١٢ - افترض أن نوعا من الكائنات البشرية يعيش على كوكب بعيد وأن اجهزتها السمعية مصممة كالتالى . تبدو رؤوس هذه الكائنات من الخارج كرووسنا نحن سكان الأرض . ومع ذلك فإن الأذنين متصلتان احدهما بالآخرى بواسطة قناة صلبة الجدار ذات مقطع دائرى قطره 1 cm ، وفى منتصف هذه القناة تماما يوجد غشاء رقيق يعمل كجلدة الطبلية ويقسم هذه القناة إلى نصفين متساويين . وينتج الاحساس بالصوت لدى هذه الكائنات عند اهتزاز هذا الغشاء . ما الذى يمكن أن تستنتجه عن القدرات السمعية لهذه الكائنات وعن طرق الاتصال اللفظية بينها ؟

مسائل

- اعتبر أن سرعة الصوت فى الهواء تساوى 340 m/s ما لم ينص على غير ذلك .
- ١ - يسمع صوت الرعد بعد 6.0 s من رؤية البرق . بفرض أن سرعة الضوء أكبر كثيرا من سرعة الصوت ، على أى بعد وقع البرق ؟
- ٢ - لاحظت متسلقة جبال أنها تسمع صدى صوتها من جبل بعيد بعد زمن قدره 4.0 s . على أى بعد يوجد هذا الجبل ؟
- ٣ - سرعة الصوت فى الماء 1500 m/s . أوجد الانضغاطية الحجمية للماء .
- ٤ - تحدد الخفافيش مواضع الاشياء فى الظلام بارسال نبضات فوق سمعية وملاحظة كيفية انعكاسها . فإذا كان تردد الموجات فوق السمعية 7×10^4 Hz ، فما هو الطول الموجى للنبضات التى ترسلها الخفافيش ؟
- ٥ - ماهو التغير المئوى فى سرعة الصوت فى الهواء إذا ارتفعت درجة الحرارة من 0°C إلى 16.5°C ؟
- ٦ - مجهر معين له فتحة دائرية قطرها 15 cm . افترض أن هذا المجهر يرسل صوتا منتظما إلى الخارج خلال الفتحة بأكملها . فإذا كانت شدة الصوت عند الفتحة 10^{-4} W/m^2 ، فما هى القدرة التى يشعها المجهر فى صورة موجات ضوئية ؟
- ٧* - حزمة من الموجات الصوتية شدتها $2 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. ماهو مستوى شدة الصوت بالديسيبل ؟
- ٨* - صوتان شدتهما 10^{-6} W/m^2 و 10^{-9} W/m^2 . بأى عدد من المرات تعتبر الأذن الصوت الأول اشد من الصوت الثانى ؟
- ٩* - إذا كانت شدة الصوت تساوى 10^{-4} W/m^2 على بعد قدره 2.0 m من المصدر ، وإذا كانت شدة الصوت تتناسب عكسيا مع مربع البعد عن المصدر ، (أ) ماهى شدة الصوت على بعد 20.0 m من المصدر ؟ (ب) ماهى النسبة بين مستويي شدة الصوت فى هذين المكانين ؟
- ١٠ - وضع مجهر صغير فى ماسورة ملتوية على شكل دائرة ومملوءة بالهواء كما هو موضح فى الشكل (م ١٥ - ١) . فإذا كان محيط الدائرة هو 12.0m ، فما هى اصغر ثلاث ترددات للمجهر لكى يكون الصوت قويا فى الماسورة ؟
- ١١ - يرسل المجهران المبيان فى الشكل م ١٥ - ٢ موجتين صوتيتين متماثلتين طولهما الموجى 34cm ، ويهتز المجهران متفقان فى الطور . (أ) أوجد أقل ثلاث قيم للمقدار x يكون عندها الصوت جهرا فى النقطة P . (ب) كرر العمل فى حالة سماع أقل صوت عند النقطة P .



شكل ١٥ - ٢



شكل ١٥ - ١ جهاز صغير

- ١٢ - اعتبر توافقيات وتر الكمان المبين في الشكل ١٥ - ٧ . افترض أن التردد الاساسي للاهتزاز 380Hz . ما هي الترددات الرنينية الخمسة التالية باعتبار أن الوتر مثبت جيدا من طرفه ؟ هل تتساوى هذه الترددات تقريبا مع القيم الموضحة في الشكل ؟
- ١٣ - أنبوبة طولها 0.75m مفتوحة من أحد طرفيها ومغلقة من الطرف الآخر . ما هي أقل ثلاث ترددات رنينية لها ؟ ارسم شكل الموجة في الأنبوبة لكل تردد .
- ١٤ - أنبوبة مفتوحة من طرفيها وطولها 0.90m ما هي اصغر ثلاثة ترددات رنينية لها ؟ ارسم شكل الموجة داخل الأنبوبة لكل تردد .
- ١٥ - في تجربة كالمبينة في الشكل ١٥ - ١٢ وجد أن الرنين يحدث عندما يكون ارتفاع الماء في الأنبوبة 31.00cm و 41.00cm . فإذا لم يكن هناك أى رنين بين هذين الارتفاعين ، أوجد تردد الشوكة الرنانة .
- ١٦ - يريد رجل أن يعين عمق سطح الماء في ماسورة من الحديد تؤدي إلى بئر قديمة ، وباجراء تجربة رنين على هذه الماسورة باعتبارها أنبوبة مغلقة من أحد طرفيها ومفتوحة من الطرف الآخر ، وجد هذا الرجل أن أصغر تردد رنيني هو 80Hz . ما هو عمق سطح الماء عند فوهة الماسورة بالتقريب ؟
- ١٧ - يبلغ طول نفق لنكولن الذي يمر تحت نهر هدسون في مدينة نيويورك حوالي 2600m . ما هي الترددات الرنينية له ؟ هل لهذه الترددات أية أهمية ؟ وان كان لها أهمية ، فما هي في رأيك ؟
- ١٨ - تردد الاهتزاز الرنيني لأنبوبة ارغن عند 0°C هو 500cps . (أ) ما هي قيمة التردد الرنيني لها عند درجة 30°C ؟ يجب أن يتوافق هذا التردد جيدا مع أنبوبة ارغن ترددها 250cps عند 0°C . (ب) هل يكون التوافق جيدا عندما تكون كلتا الأنبوبتين في درجة 30°C ؟ اشرح الجوابك .
- ١٩ - بأي سرعة يجب أن تتحرك سيارة تجاهك بحيث يبدو تردد نفيها أكبر بمقدار 10% من تردده عندما يكون ساكنا .
- ٢٠ - يتحرك مصدر صوتي تردده 100cps مبتعدا عن مشاهد بسرعة قدرها 18 m/s . فإذا كانت سرعة الصوت 332 m/s ، فما هو تردد الصوت الذي يسمعه المشاهد ؟
- ٢١ - قورن تردد مجهول بشوكة زنانة قياسية ترددها 2200cps فوجد أنه يعطي ضربتين في الثانية . (أ) ما هي القيم المحتملة للتردد المجهول ؟ (ب) كيف يمكنك أن تعين القيمة الحقيقية إذا كان لديك قطعة من اللبان ؟
- ٢٢ - قارن عازف كمان نغمة صادرة من وتر كمانه بالنغمة المقابلة على البيانو فوجد أن الضربات بين الصوتين تحدث مرة في كل 3 s . (أ) ما هو الفرق بين عددي الاهتزازات في الثانية للآتين الموسيقيين ؟ (ب) كيف يستطيع عازف الكمان أن يعزف النغمة ذات الدرجة العالية ؟
- ٢٣ - سرعة الصوت في الايدروجين تساوى حوالي 1270 m/s . ملأت أنبوبة ارغن ترددها الرنيني الاساسي في الهواء 800cps بالايديروجين ، ما قيمة التردد الرنيني الاساسي في هذه الحالة ؟

٢٤* - أنبوبة طولها 40 cm مغلقة عند أحد طرفيها ومفتوحة عند الطرف الآخر . ويحدث الاهتزاز الرنيني في هذه الأنبوبة تحت تأثير مصدر صوتي تردده 210 cps بشرط أن يكون هذا المصدر متحركا بحيث يبتعد عنها . بأي سرعة يجب أن يتحرك المصدر ؟ (اعتبر $v=320$ m/s)

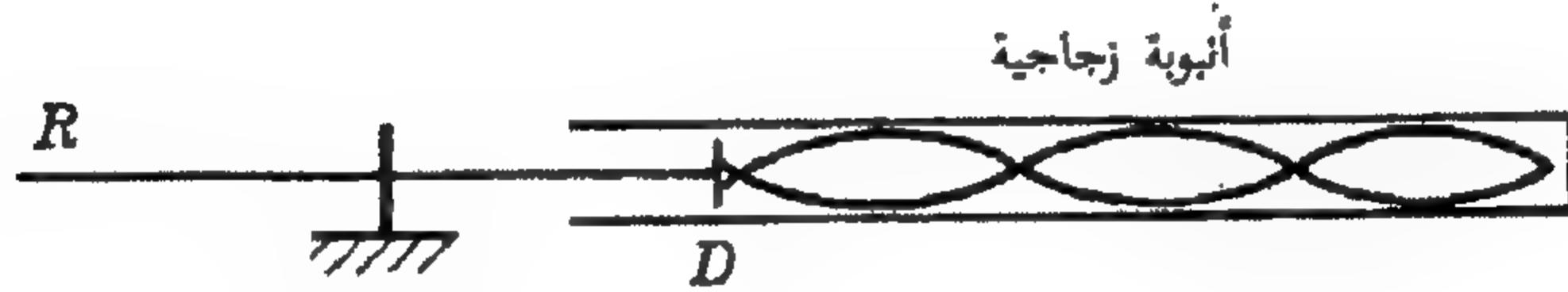
٢٥** - اثبت أن تردد الصوت f' الذى يسمعه رجل يتحرك مقتربا بسرعة قدرها v_m من نغير ساكن تردده f يعطى بالعلاقة :

$$f' = \frac{v + v_m}{v} f$$

أو :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v_m}{v}$$

٢٦*** - يستخدم الجهاز المبين في الشكل م ١٥ - ٣ ، وهو يسمى أنبوبة كولت ، أحيانا لقياس سرعة الصوت في القضبان المعدنية . عندما يطرق القضيب R في اتجاه طوله بقطعة من القماش مشبعة بالقلفونية فإنه يتحرك حركة اهتزازية طولية رنينية مع تكون بطن عند القرص وعقدة عند نقطة التثبيت . ويرسل القرص D المثبت في نهاية القضيب موجات صوتية بنفس التردد في الأنبوبة . وعندما تضبط الأنبوبة في موضع الرنين ، كما هو مبين في الشكل ، يبين تراب الفلين في الأنبوبة مواضع العقد والبطن في الهواء بوضوح . فإذا وجد أن المسافة بين بطنين متجاورين هي 10.0 cm ، وكان طول القضيب 100.0 m أوجد سرعة الصوت في القضيب المعدني .



شكل (م ١٥ - ٣)

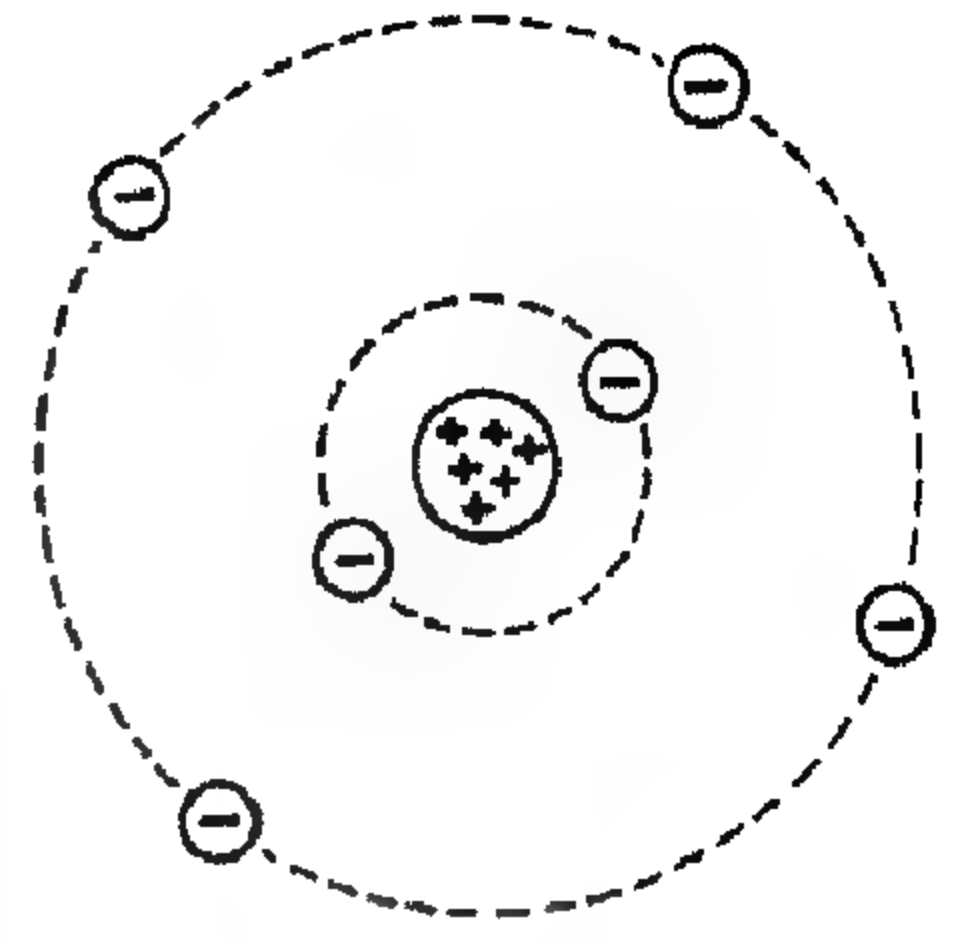
الفصل السادس عشر

الشحنات الكهربائية الساكنة الكهربية الاستاتيكية

سنبدأ دراستنا للكهرباء بالكهربية الاستاتيكية ، أو فيزياء الشحنات الكهربائية عند السكون . سنناقش التجاذب والتنافر بين الشحنات ، المجالات الكهربائية ، وكذا مفهوم فرق الجهد الكهربائي . وسنلاحظ مدى قرب المفاهيم الكهربائية من المبادئ التي درسناها في الميكانيكا . فقانون حفظ الطاقة سيثبت انه عظيم الأهمية في الكهرباء كما هو كذلك فيما سبقت دراسته من مجالات الميكانيكا والحرارة . وحين نكمل دراستنا عن الكهرباء الساكنة فاننا سنكون قد أعددتنا لبحث سلوك الشحنات المتحركة ، وسيتم عمل هذا في الفصول التالية .

١٦ - ١ الذرات كمصادر للشحنة*

تتكون الذرة من نواة دقيقة موجبة الشحنة يدور حولها جسيمات سالبة الشحنة تدعى الإلكترونات ، ويتمثل هذا في الرسم التخطيطي لذرة الكربون في الشكل ١٦ - ١. ولاشك أننا نذكر من مقررات الكيمياء أن كل الذرات متعادلة كهربيا ، بمعنى أن كمية الشحنات الموجبة على النواة تساوى تماما مجموع شحنات الإلكترونات حول النواة . في حالة ذرة الكربون المبينة ، إذا كانت e - هى شحنة كل إلكترون ، فإن الشحنة على النواة يجب أن تكون $+6e$ وسنرجى المناقشة التفصيلية للذرة إلى فصل قادم وسنكتفى هنا بالتركيب الكهربائى فقط .



شكل ١٦ - ١ .

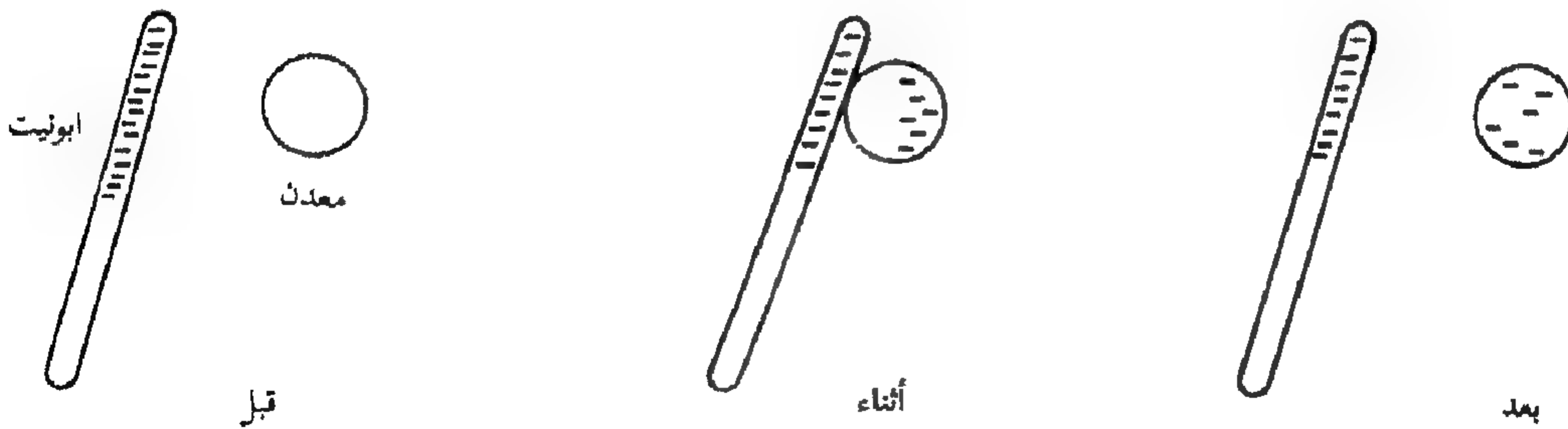
تمثيل تخطيطي لذرة الكربون .
توازن الشحنات السالبة
للالكترونات الستة مع
الشحنة الموجبة للنواة .
(النواة والالكترونات أصغر
بكثير عما هو مبين
بالشكل) .

وعلى ما يبدو فالكون كله يعتبر تقريبا ، ان لم يكن تماما متعادلا من وجهة النظر الكهربائية . والأرض عليها فائض قليل جدا من الشحنات الموجبة أو السالبة (وقد لا يوجد فائض) . ومن الناحية العملية يمكن اعتبار أن الأرض ليس عليها شحنات فائضة . والأغلبية الساحقة للشحنات على الأرض أو بداخلها تبقى كمكونات للذرات . وحين توجد شحنات طليقة ، سالبة أو موجبة ، فإنها تعتبر منتزعة من ذرات معينة .

وفي الواقع فانه ليس من الصعوبة في شيء ان يزال الكترون من ذرة ماتحت ظروف معينة . فاذا حككنا ، مثلا ، عمودا من الابونيت (المطاط الصلب) بفراء حيوانى ، فان بعض الالكترونات من ذرات مادة الفراء تنفصل لتلتصق بعمود الابونيت . (ليس من السهل شرح السبب في انتقال الشحنات الذى حدث ويمكن دراسة هذا الموضوع في مقررات تتناول فيزياء الجوامد) . أى أن عمود الابونيت قد اكتسب فائضا صافيا من الالكترونات ، وحين يحك العمود بجسم معدنى ، فان عددا من الالكترونات الزائدة تنتقل الى المعدن ، كما هو موضح في شكل ١٦ - ٢ .

شكل ١٦ - ٢

عندما يلمس عمود الابونيت
ذى الشحنة السالبة الكرة
المعدنية غير المشحونة ، فان
الالكترونات تنفصل
بالتوصيل من العمود الى
الكرة .



* تعتبر مادة هذا الفصل أساسية لدراسة الكهرباء برمتها وكذا لجميع جوانب الطبيعة التى تنطوى على تأثيرات كهربائية لذا فمن المهم فهم هذه المادة جيدا قبل الانتقال الى دراسة الفصول التالية .

وبالمثل ، حين يحك عمود زجاجي بالحريز فان بعض الالكترونات تغادر ذرات الزجاج وتؤدي الى ظهور الفائض من الالكترونات على الحريز . ومن الطبيعي أن العمود الزجاجي قد أصبح لديه الآن فائض من الشحنات الموجبة . اذا لمس العمود الزجاجي كرة معدنية متعادلة فان الالكترونات تغادر بعض ذرات المعدن لتحل محل الالكترونات التي فقدتها الذرات الموجودة في العمود الزجاجي . ونتيجة لهذا تكتسب الكرة المعدنية شحنة موجبة صافية . ويؤدي احتكاك كثير من المواد ببعضها البعض الى فصل الشحنات . وقد استخدمت الحالات التي وصفناها الآن لتعريف الشحنات الموجبة والسالبة من قبل أن يعرف بوجود الالكترون .

١٦ - ٢ القوى بين الشحنات

الآن وقد عرفنا كيف نحصل على اجسام مشحونة ، أصبح من الممكن فحص القوى الموجودة بين الشحنات ، وأحد أبسط الطرق لعمل هذا هو بالاستفادة من كرات النخاع الدقيقة وهي كرات خفيفة جدا ، مغطاة بدهان معدني . ومن السهل شحن هذه الكرات باستخدام سيقان من الزجاج أو الالبونيت . اذا علق الكرات بخيوط خفيفة فان أربع تجارب شيقة يمكن أن تجرى ، وهي موضحة في الاشكال ١٦ - ٣ الى ٥ .

ومن النتائج العملية الموضحة في شكل ١٦ - ٣ نستنتج التالي :

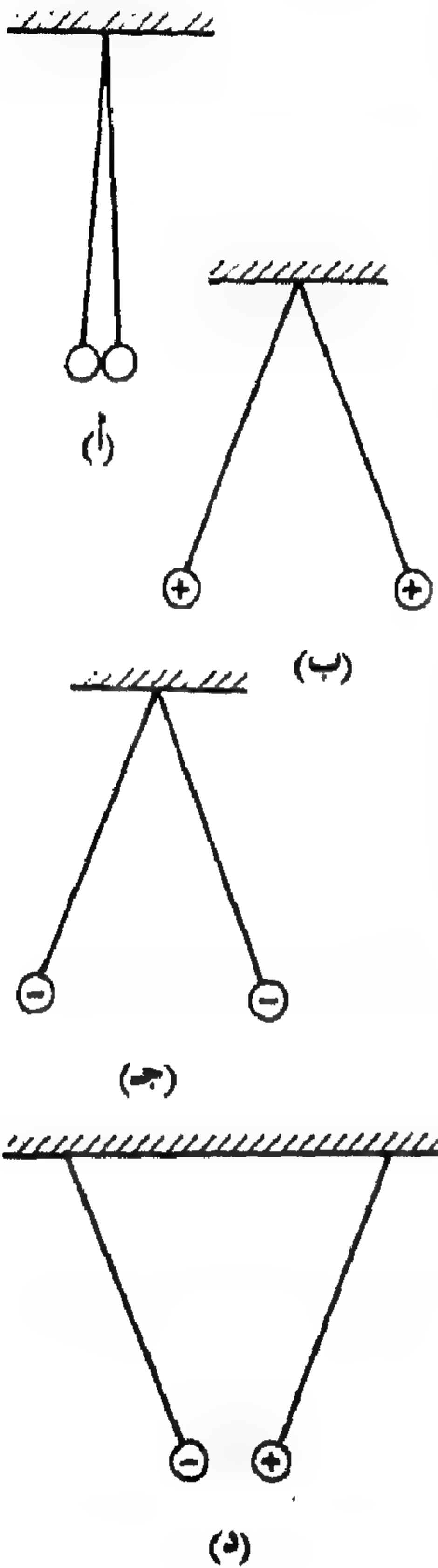
- ١ - تتنافر الشحنات المتشابهة بمعنى أن شحنتين موجبتين تتنافران وكذا تفعل شحنتان سالبتان .
- ٢ - تتجاذب الشحنات المختلفة أي أن الشحنات الموجبة تجذب السالبة والعكس بالعكس .
- ٣ - مقدار القوة الكهربائية بين جسمين مشحونين يزيد دائما على قوى التجاذب بين الجسمين (كيف يمكن للتجارب أن توضح هذه الحقيقة ؟)

١٦ - ٣ العوازل والموصلات

على الرغم من أن كل المواد تتركب من ذرات وأن كل الذرات تتكون من الكترونات ونوى الا أننا جميعا نعلم مدى تفاوت الخواص الكهربائية للمواد . هناك مجموعتان رئيسيتان يمكن أن تنقسم اليها كل المواد حسب خواصها الكهربائية ، وهاتان هما مجموعة الموصلات ومجموعة غير الموصلات أو العوازل* .

* حين تقع المواد في الوسط بين هاتين المجموعتين فانها تسمى أشباه الموصلات . وبعض الناس يميلون الى تصنيفهم كمجموعة مستقلة .

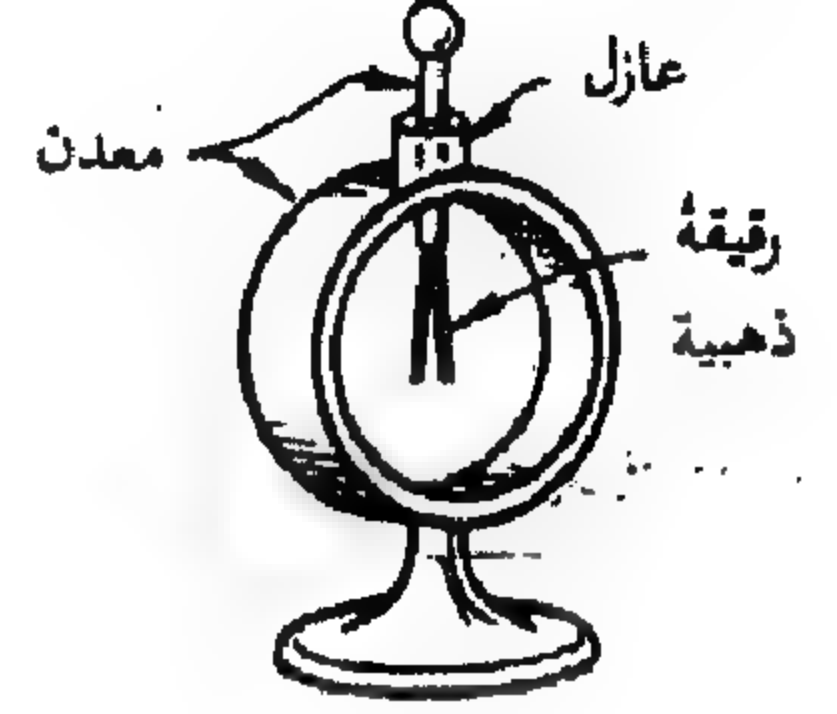
نوعان من
الشحنة



شكل ١٦ - ٣

تبين كرات النخاع المشحونة كيف أن الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض بينما تتجاذب الشحنات المختلفة مع بعضها البعض .

في المجموعة الثانية ، العوازل ، تكون الالكترونات كل ذرة على ارتباط وثيق بها ولا تقدر على التجوال داخل المادة . ولذا فانه حتى لو وضع مزيد من الشحنات بالقرب من نهاية عمود من مادة عازلة ، فان الالكترونات في الذرات المجاورة لن تستطيع الحركة تحت تأثير التجاذب أو التنافر مع الشحنات المجاورة ، فهذه الالكترونات مرتبطة بشدة مع ذراتها ولا تقدر على التحرر وعليه لا توجد حركة كبيرة للشحنات داخل العمود .



أما الموصلات فسلوكها مختلف تماما ، فالالكترونات الموجودة بالقرب من الجزء الخارجى للذرة وتسمى **الالكترونات التكافؤ** ، تقع بالقرب من الذرات المجاورة بحيث يصبح من الصعب تحديد انتماء الكترون مالى ذرة مابدة . وتحت هذه الظروف تقوم الالكترونات التكافؤ بالحركة خلال المعدن ويمكن أن ينظر اليها في بعض الأغراض على الأقل - على أنها تكون غازا الكترونيا محبوسا داخل حدود قطعة المعدن . وحتى في المعادن فانه فيما عدا الالكترونات القريبة من خارج الذرة والتي تعتبر طليقة ، فإن اغلب الالكترونات مرتبطة بشدة مع الذرات ، والالكترونات التكافؤ التي يمكن اعتبارها طليقة تكون عادة الكترونا أو اثنين أو ثلاثة في كل ذرة .

شكل ١٦ - ٤
أحد أغطا المكشاف الكهربي
(الالكتروسكوب) ذى
الورقة الذهبية . يتكون الجزء
المركزي من كرة معدنية ،
قضيبي معدني وأوراق من
رقائق الذهب ، وهذا الجزء
معزول عن العلبة .

يجب أن ندرك أن الصياغة المتقنة لحركة الشحنات بداخل الجوامد تعتبر مشكلة معقدة جدا ، ويمكن تناولها باستخدام ميكانيكا الكم . يعتبر السوك الحقيقي للالكترونات داخل الجوامد مجالا نشطا للبحث حتى يومنا هذا ، وعلى الأخص بالنسبة للمواد التي تعتبر وسطا بين الموصلات وغير الموصلات أو ما تسمى أشباه الموصلات .

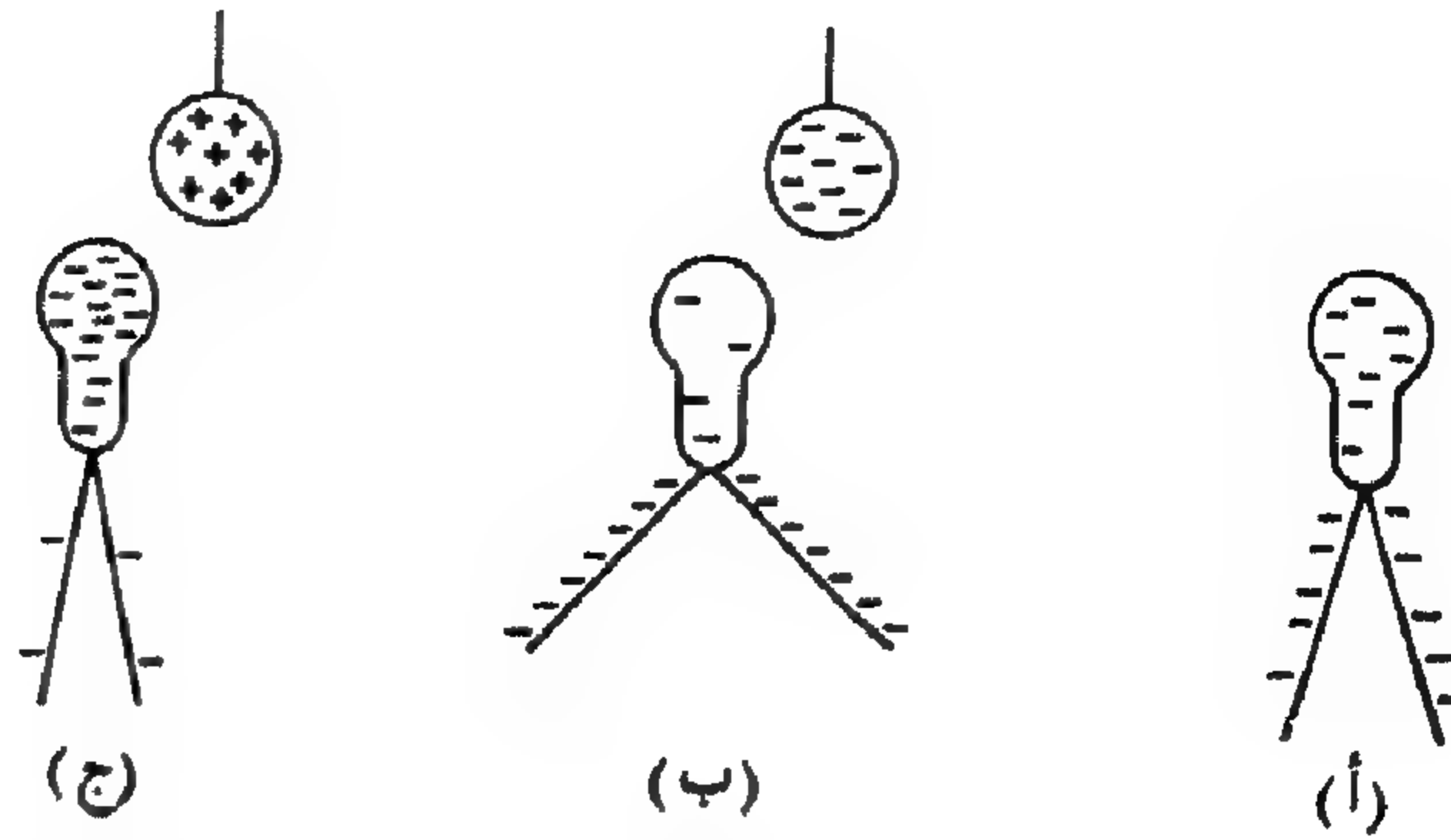
١٦ - ٤ المكشاف الكهربي (الالكتروسكوب)

يعتبر المكشاف أداة بسيطة تستخدم في قياس شحنات ضئيلة القيمة ، ويوضح الشكل ١٦ - ٤ نموذجا له . هناك قضيب معدني معلق بطرفه ورقتان رقيقتان جدا من رقائق الذهب يثبت القضيب المعدني داخل علبة معدنية بواسطة عازل يمنع تلامس القضيب بالعلبة المعدنية . يغطي وجهان من اوجه العلبة المعدنية بالزجاج حتى يمكن رؤية الوضع الذي تتخذه رقائق الذهب .

لنفرض أن بعض الشحنات السالبة قد وضعت على القضيب المركزي وذلك بملامسته مع قطعة مشحونة من الابونيت . والشحنة تكون وقفا على القضيب والرقائق تماما حيث انهم معزولون عن بقية الأشياء . ولما كانت الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض ، فان الشحنات السالبة ستقوم بتوزيع نفسها بشكل منتظم على القضيب والرقائق الذهبية . على أن حرية حركة الوريقات الذهبية في أن تنحني يجعلها

تتبع نتيجة للشحنات الموجودة عليها متخذة بذلك الوضع الموضح في الشكل ١٦ - أ .

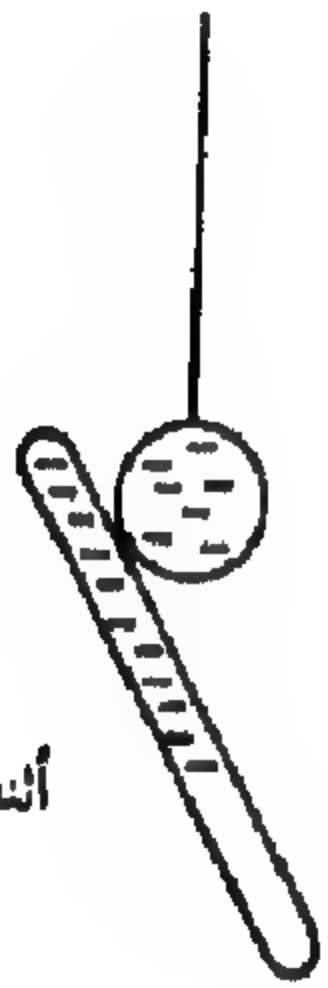
شكل ١٦ - ٥
يستخدم المكشاف الكهربائي المشحون لتعيين الإشارة والقيمة التقريبية للشحنة الموجودة على جسم ما .



لو أن كرة مشحونة سالبة اقتربت من كرة المكشاف الكهربائي كما هو موضح في الشكل ١٦ - ٥ ب فإن كثيرا من الشحنات السالبة التي على القضيب ستتدافع إلى أسفل مسببة مزيدا من التباعد بين الرقائق الذهبية . ويحدث العكس تماما إذا اقتربت كرة مشحونة موجبة من كرة المكشاف الكهربائي (الشكل ١٦ - ٥ جـ) . وبالإضافة إلى هذا فإن كرة غير مشحونة لن تؤدي إلى تأثير يذكر إذا اقتربت من المكشاف الكهربائي . ويمكننا باستخدام هذا الجهاز تعيين إشارة الشحنة وتقدير قيمتها التقريبية . وعليك الآن أن تقنع نفسك أن اجراء مشابها يمكن تتبعه لو أن المكشاف الكهربائي كان مشحونا بشحنة موجبة .



قبل



أثناء



بعد

١٦ - ٥ الشحن بالتوصيل وباللمس

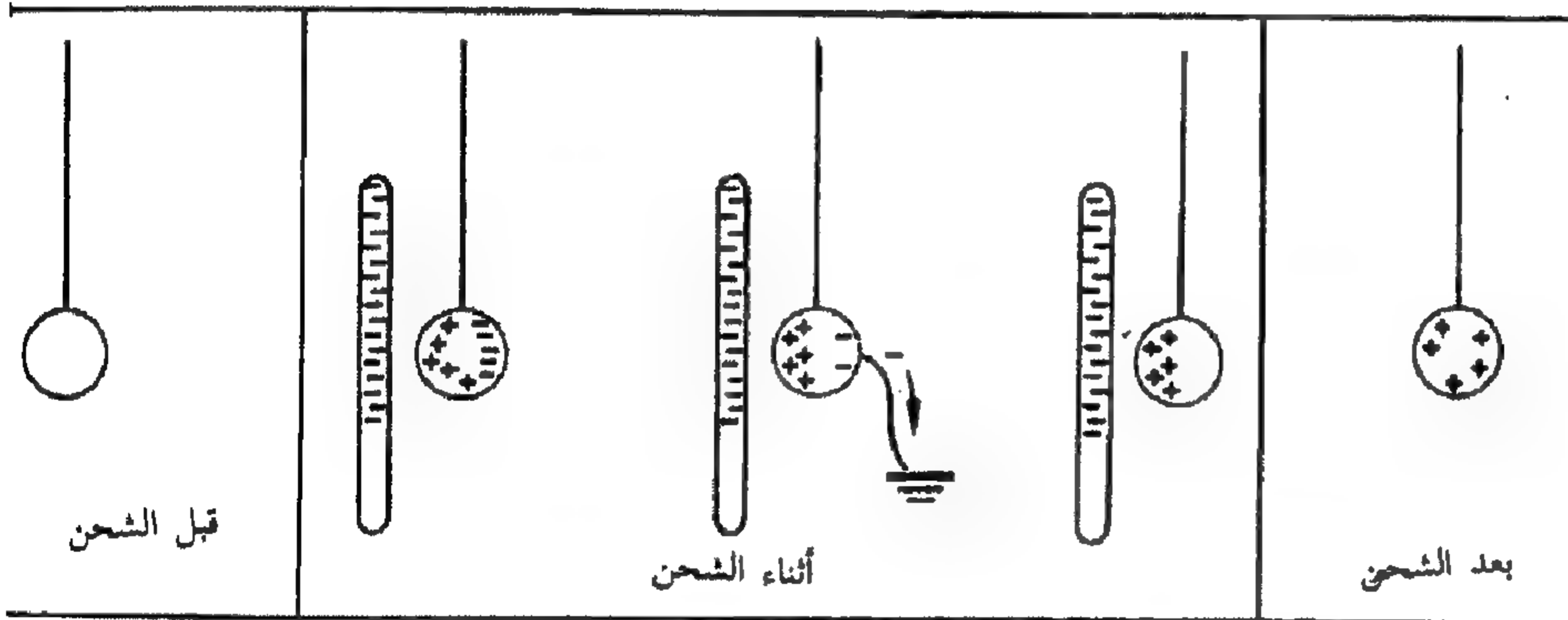
هناك طريقتان عامتان لوضع شحنات على جسم معدني باستخدام جسم ثان سبق شحنه . وكمثال محدد ، اعتبر مسألة شحن كرة معدنية باستخدام قضيب من الالومنيوم مشحون بشحنة سالبة ، يمكننا شحن الكرة وذلك بلمسها بالقضيب بكل بساطة ، وعند التلامس تنتقل بعض الشحنات السالبة الفائضة من القضيب إلى الكرة . ويوضح الشكل ١٦ - ٦ هذه العملية المسماة « الشحن بالتوصيل »

شكل ١٦ - ٦
يمكن شحن كرة معدنية بواسطة التوصيل ، تلاحظ أن الشحنة قد قسمت وأن كل من الكرة والقضيب لهما نفس نوع الشحنة .

يستخدم نفس القضيب بطريقة أخرى لشحن الكرة كما هو موضح في شكل ١٦ - ٧ يتم هنا شحن الكرة باللمس حيث لا يقوم القضيب بلمس الكرة على الإطلاق . نلاحظ أنه حين يقترب القضيب من الكرة فإن بعض الإلكترونات الموجودة في المعدن تتنافر إلى الجانب الأيمن من الكرة مخلقة شحنة موجبة على الجانب

الأسير ، ولما كنا لم نضف أو نأخذ شحنات من الكرة فإنها تظل متعادلة بالطبع .
والآن لنفرض أن الكرة لمست بواسطة جسم آخر كإصبع إنسان مثلا . (يقال لهذه
الحالة أن الكرة قد وصلت بالأرض (أرضت) ، والرمز المستخدم لبيان هذه العملية
هو «—») ويمكن إزالة الشحنات السالبة بعيدا عن القضيب إذا سمح لها بالسريان
خلال الجسم الذى لمس الكرة ، فإذا حدث هذا فإن الكرة لا تعود متعادلة حيث أنها
قد فقدت بعضا من شحناتها السالبة . والآن بعد إزالة الجسم الذى لمس الكرة ،
يمكن أبعاد القضيب أيضا وتصبح الكرة مشحونة بشحنة موجبة . (لماذا وجب أن
يبعد الجسم اللامس أولا ثم القضيب بعد ذلك ؟)

عند مقارنة الشكلين ١٦ - ٦ ، ١٦ - ٧ فإننا نجد أن قضيبا من الالبونيت يمكن
أن يستخدم فى شحن جسم معدنى بشحنة سالبة بالتوصيل ويمكنه شحن نفس
الجسم بشحنة موجبة بالحث . قد يكون من الشيق بالنسبة لك أن ترسم أشكالا
مشابهة باستخدام قضيب زجاجى مشحون بشحنة موجبة ، حيث تكون الشحنات
ذات إشارة معاكسة فى هذه الحالة .

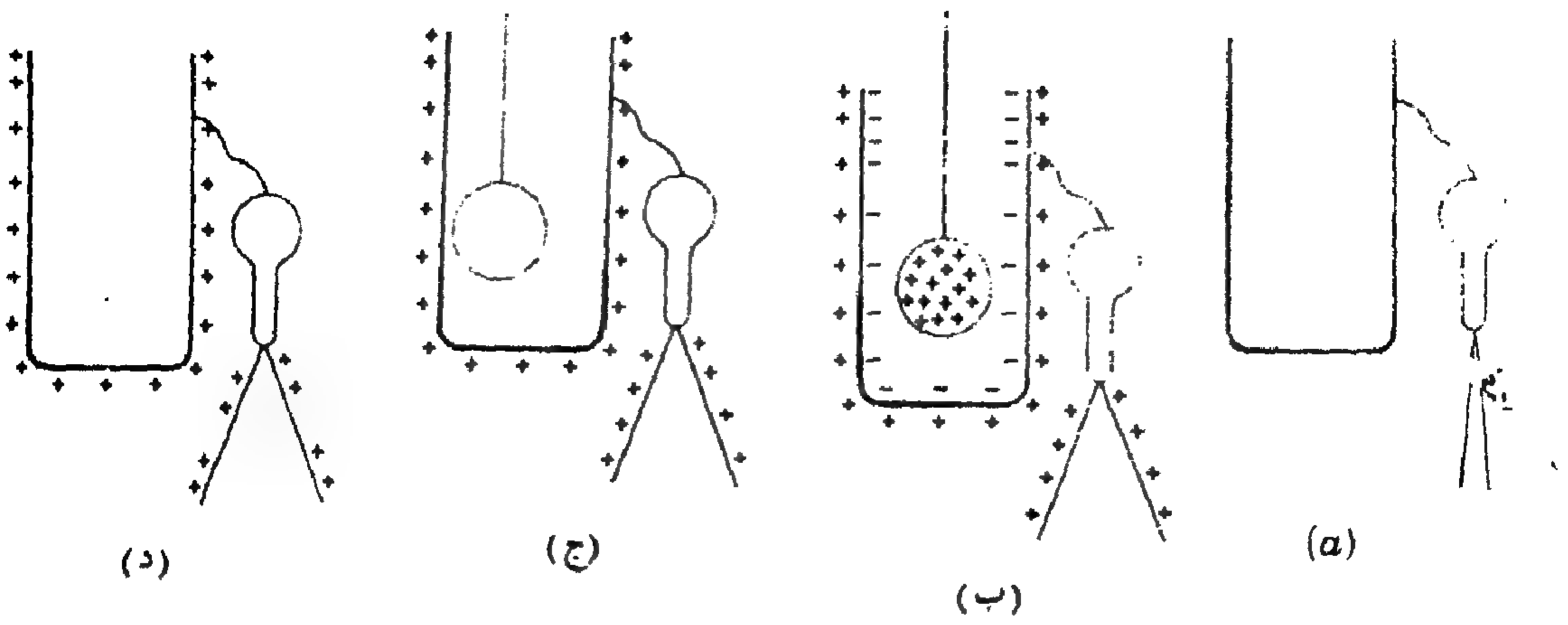


شكل ١٦ - ٧
طريقة اعطاء كرة معدنية
شحنة موجبة بالحث .
نلاحظ أن القضيب والكرة
لهما شحنات مختلفة

١٦ - ٦ تجربة دلو الثلج لفاراداي

فى عام ١٨٤٣ أجرى مايكل فاراداي لأول مرة تجربة بسيطة ولكنها مفيدة للغاية إذ
أوصل دلو معدنيا للثلج بمكشاف كهربائى كما موضح فى الشكل ١٦ - ١٨ . علقت
بعد ذلك كرة معدنية بخيط ثم أعطيت شحنة موجبة وتركت لتتدلى داخل الدلو
(بدون أن تمس جدرانه) فلاحظ أن وريقات الذهب فى المكشاف قد تباعدت .
والاكثر من هذا أن حركة الكرة من مكان الى آخر داخل الدلو لم تغير من وضع
الوريقات الذهبية فظلت منفرجة . ولم تعد الوريقات الى وضعها الأصيل إلا حين
أبعدت الكرة من داخل الدلو .

*حين يراد توصيل جسم بالأرض فهو يوصل عادة بأنبوبة المياه أو بجسم مدقون فى الأرض بحيث أن أية شحنة فائضة
تسرى الى الأرض ، أى الى الكرة الأرضية .



شكل ١٦ - ٨
تجربة دلو الثلج لفاراداي

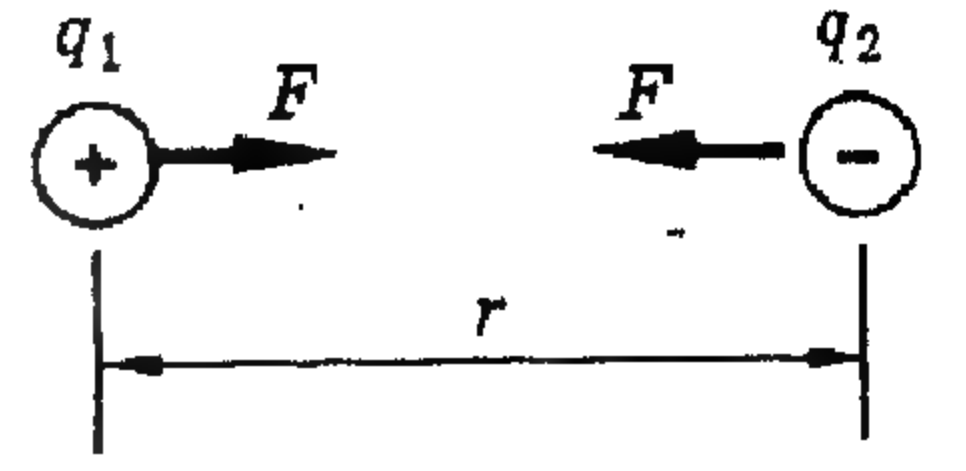
وقد لاحظ فاراداي أيضا أن الكرة المعدنية المشحونة إذا لمست جدار الدلو فإن وريقات المكشاف تظل كما هي منفرجة مثلما كانت قبل اللمس ، فإذا أبعدت ، الآن الكرة المعدنية من الدلو فإن الوريقات لاتعود الى وضعها الأصلي وتظل منفرجة . وحين تقرب الكرة المعدنية بعد ذلك من مكشاف آخر فانها توجد غير مشحونة على الإطلاق . وعلى ما يبدو ، فإن لمس الكرة لجدار الدلو الداخلى قد جعل الشحنة الفائضة على الكرة تتعادل تماما . ولما كانت وريقات المكشاف متصلة بالجدار الخارجى للدلو ولم تتحرك حين لمست الكرة الجدار الداخلى ، فإن فاراداي قد استنتج أن الوجه الداخلى للدلو كان لديه من الشحنات ما هو كاف لمعادلة الكرة .

من هذه التجارب يمكننا الوصول الى الاستنتاجات التالية ، والموضحة بالأشكال ١٦ - ٨ ب الى د .

- ١ - عند تعليق جسم معدني مشحون بداخل وعاء معدني متعادل فإن هذا يؤدي الى ظهور شحنات بالحث مساوية ومعاكسه على الجدار الداخلى للوعاء .
- ٢ - اذا لمس الجسم المعدني المشحون الجدار الداخلى للوعاء فإن الشحنة التي ظهرت بالحث تعادل تماما الشحنات الفائضة على الجسم المعدني .
- ٣ - اذا وضع جسم مشحون داخل وعاء معدني ، فإن شحنة مساوية وذات نفس الإشارة تظهر على السطح الخارجى للوعاء .
- ٤ - حين يتوفر مسار للتوصيل فإن كل الشحنات الموجودة على الجسم المعدني تستقر على سطحه الخارجى .

١٦ - ٧ قانون كولوم

لقد صيغ القانون الرياضى الذى يعبر عن تنافر الشحنات المتشابهة وتجاذب الشحنات المختلفة عام ١٧٨٥ بواسطة شارل أوجستين دى كولوم (١٧٣٦ - ١٨٠٦) وسمى بقانون كولوم . وقد أستخدم ميزان حساس جدا ، شبيه بذلك الذى استخدمه كافندش لدراسة الجاذبية ، لقياس القوة بين كرتين صغيرتين مشحونتين بدقة. وكنموذج على الموقف نرى الشكل ١٦ - ٩ هناك كرتان صغيرتان ، أصغر بكثير عما هو موضح ، تبعدان مسافة r بين مركزيهما ، وتحملان الشحنات $+q_1$ و $-q_2$ وقد استنتج كولوم ، بعد عدد من التجارب أن القوة المؤثرة على الكرة ١ تتناسب طرديا مع حاصل ضرب الشحنتين وعكسيا مع مربع المسافة بينهما . وبالرموز



شكل ١٦ - ٩

الشحنتان المختلفتان ، غير المتساويتين تجذبان بعضهما البعض بقوة متساوية .

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

أو

$$F = (\text{const}) \left(\frac{q_1 q_2}{r^2} \right)$$

١٦ - ١

وتكون القوة فى الإتجاه الموضح فى شكل ١٦ - ٩ . وحسب قانون الفعل ورد الفعل لنيوتن فإن القوة المؤثرة على الكرة ٢ كانت مماثلة فى المقدار ولكنها مضادة فى الإتجاه . نلاحظ أن قانون كولوم ينطبق فقط فى حالة الشحنات النقطية ، فإذا كانت الشحنات ممتدة فوق منطقة كبيرة فإن المسافة r بين الشحنات لا يصبح من السهل تحديدها .

يعتمد المقدار الثابت فى قانون كولوم على الوحدات المستخدمة لكل من الكميات الطبيعية الموجودة فى المعادلة . وقد استخدم نظام للوحدات يجعل هذا المقدار الثابت مساويا للوحدة لعدة سنوات ولكن النظام لم يكن - للأسف - هو نفسه المستخدم فى التطبيقات الكهربائية العملية ، كما انه لم يكن ينتمى الى نظام (الوحدات الدولية) SI . وللتغلب على هذه الصعوبات فإن علينا أن نستخدم ثابتا للتناسب فى قانون كولوم يكون أكثر تعقيدا . وهذا التعقيد يتيح لنا أن نستخدم كلا من نظام SI للوحدات وكذا الوحدات الكهربائية الشائعة (أو العملية) وبناء على هذا فإننا نستخدم وحدة للشحنات هى الكولوم (C) التى سنعرفها بدقة فيما بعد بدلالة القوى الموجودة بين التيارات الكهربائية . ولدينا الآن الشكل التالى لقانون كولوم ،

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

قانون كولوم

١٦ - ٢

حيث F مقاسة بالنيوتن ، r بالمتر ، q بالكولوم أما $k = 8.9874 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ وسنقوم فى معظم حسابات هذا الكتاب بجعل $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$

للحصول على احساس بمحجم وحدة الشحنات وهي الكولوم فإن الحقائق التالية يجب أن تلاحظ. إن مقدار الشحنة على الإلكترون والبروتون تعتبر كسرا صغيرا من الكولوم $1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$ ولم يمكن أبدا إيجاد شحنة أصغر من هذه القيمة بل إنه ليست هناك شحنة دون أن تكون مضاعفات صحيحة لهذا الكم من الشحنة الأساسية ، لذا فنحن نعتقد أن كل الشحنات تتكون من مضاعفات هذه القيمة الأساسية . على أن كرات النخاع الصغيرة حين تشحن قد تحمل شحنات فائضة تقدر بالميكروكولوم 10^{-6} C أو $1 \mu\text{C}$ أى أن تلك الكرات قد تحمل مليون مليون من كمات الشحنة ، وكم الشحنة يمثل بالرمز e وهو $e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$

والشحنة التي يحملها الإلكترون وهي $-e$ سالبة بينما شحنة البروتون $+e$

مثال توضيحي ١٦ - ١ وزن « بنس » نحاسى حوالى 3g ويحتوى على حوالى 3×10^{22} ذرة نحاس . افترض أن بنسين وضعا على مسافة 2.0 m بعيدا عن بعضهما البعض وكان كل منهما يحمل شحنة مقدارها q . (أ) فما مقدار الشحنة q إذا كانت قوة التنافر التي يؤثر بها أحدهما على الآخر تساوى وزن البنس ؟ (ب) ماعدد الإلكترونات التي يجب أن تزال من البنس حتى يكتسب تلك الشحنة ؟ (ج) ماهى نسبة عدد الذرات التي فقدت الإلكترونات فى مثل تلك الحالة ؟

طريقة الحل : (أ) يوضح الشكل ١٦ - ١٠ الموقف المطروح . كتلة البنس الواحد هى 3g أو $3 \times 10^{-3} \text{ Kg}$. وزن البنس هو mg أو 0.0294 N . ينص قانون كولوم على أن $F = kq_1q_2/r^2$ ولذا فقوة التنافر لأحد البنسين هى :

$$F = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{q^2}{(2.0 \text{ m})^2}$$

حيث $F = 0.0294 \text{ N}$ فى هذه الحالة . وإذا أوجدنا q فانها تساوى $3.6 \times 10^{22} \text{ C}$ (ب) عندما يزال الكترون من البنس فإنه يخلف وراءه شحنة غير متزنة موجبة قدرها 1.6×10^{-6} ، وعليه فعدد الإلكترونات التى أزيلت يجب أن يكون :

$$2.3 \times 10^{13} = \frac{3.6 \times 10^{-6} \text{ C}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ C}}$$

(ج) حيث أن كل بنس يحتوى على 3×10^{22} ذرة لذا فكسر الذرات التى فقدت الكترون منفردا يكون :

$$7.7 \times 10^{-10} = \frac{2.3 \times 10^{13}}{3 \times 10^{22}} = \text{الكسر}$$

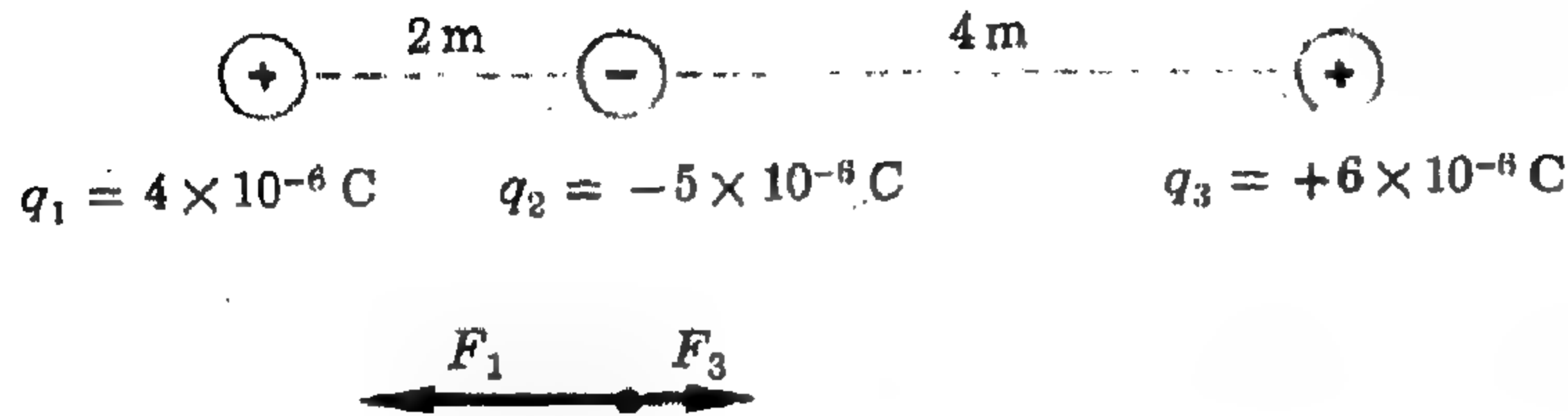


شكل ١٦ - ١٠
كما هو موضح فى المثال
التوضيحي ١٦ - ١ فإن
كسرا صغيرا من الإلكترونات
تلزم إزالته من البنس حتى
يبيح ظهور قوة كهربية
كبيرة .

لاحظ أن كسرا صغيرا جدا من الالكترونات وجبت إزالته حتى نعطي الجسم شحنة ملموسة ولاحظ أيضا أن شحنات تبلغ من الضالة $10^{-6}C$ كافية لخلق قوى محسوسة يمكن قياسها بين أجسام ذات احجام معتادة .
مثال توضيحي ١٦ - ٢ إيجاد القوة المؤثرة على مركز الشحنة المرسومة في شكل

١٦ - ١١ .

شكل ١٦ - ١١



تنجذب الشحنة المركزية الى q_1 بقوة قدرها F_1 والى الشحنة q_3 بقوة قدرها F_3 .

طريقة الحل : من الواضح أن الشحنة q_2 ستنجذب الى q_1 بقوة قدرها F_1 وتنجذب أيضا الى الشحنة q_3 بقوة F_3 . باستعمال قانون كولوم ، نجد أن :

$$F_1 = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \text{ m})^2} = 0.0450 \text{ N}$$

$$F_3 = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(5 \times 10^{-6} \text{ C})(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 0.0169 \text{ N}$$

وتكون القوة الكلية المؤثرة على q_2 الى اليسار :

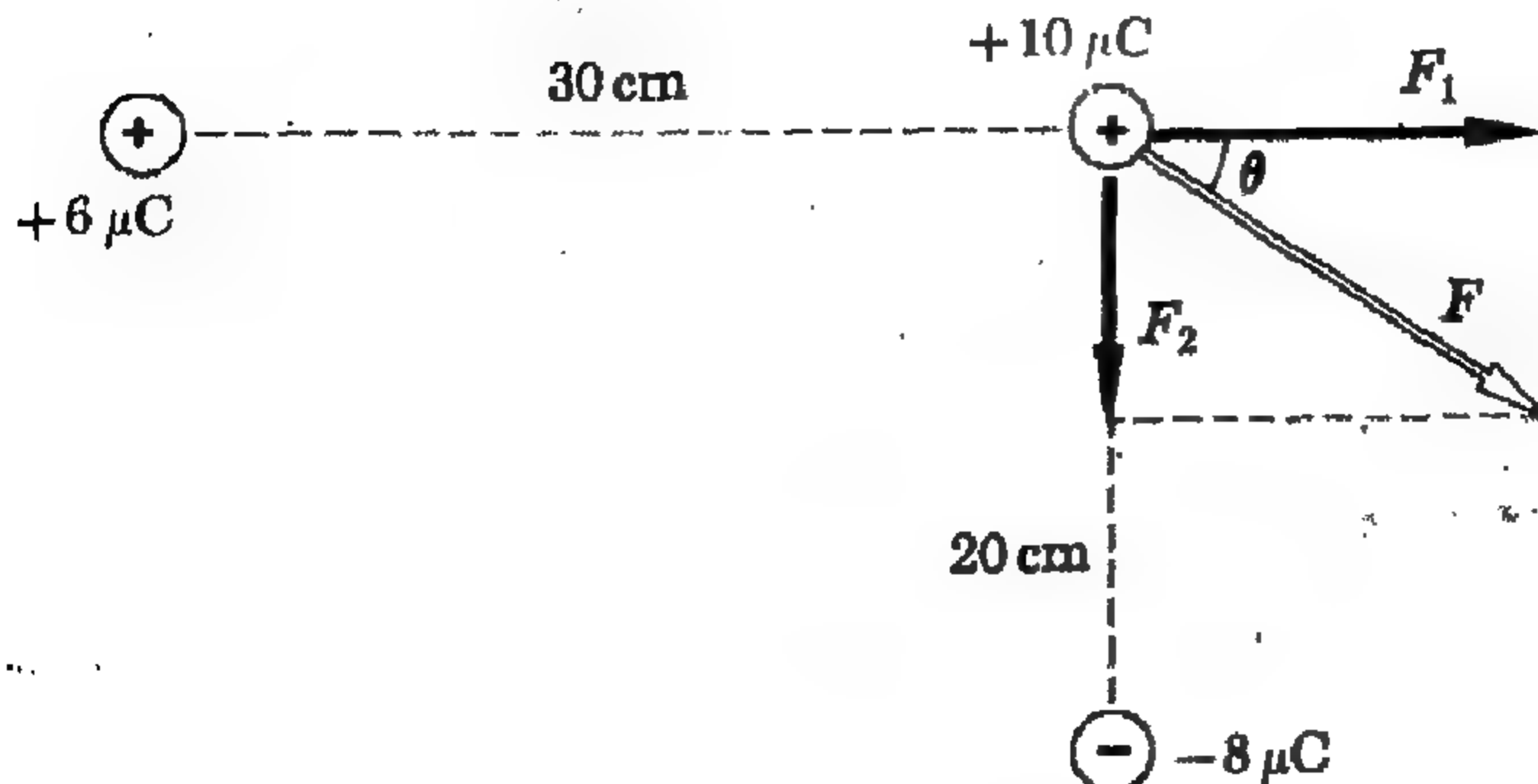
$$F = F_1 - F_3 = 0.0281 \text{ N}$$

يلاحظ أن اشارات الشحنات لم تستخدم حين طبقنا قانون كولوم وذلك لأنها متضمنة في اتجاهات القوى ، ويمكننا هذا من حساب مقدار القوة باستعمال قانون كولوم ثم الاشارة بواسطة رسم اتجاهي الى أى الاتجاهات يكون موجبا وايها سالبا .
مثال توضيحي ١٦ - ٣ . اوجد القوة المؤثرة على الشحنة $+10^{-6}C$ في الشكل

١٦ - ١٢ .

شكل

شكل ١٦ - ١٢



لايجاد القوة المحصلة التي تؤثر على الشحنة $+10^{-6}C$ فاننا يجب أن نضيف القوتين المنفصلتين التي تؤثر بهما الشحنتان الأخريان عليها .

طريقة الحل : نرسم القوى المؤثرة على الشحنة المذكورة . باستخدام قانون كولوم ،
 $F = kq_1q_2/r^2$ فإننا نجد بسهولة أن :

$$F_2 = 18 \text{ N}$$

$$F_1 = 6 \text{ N}$$

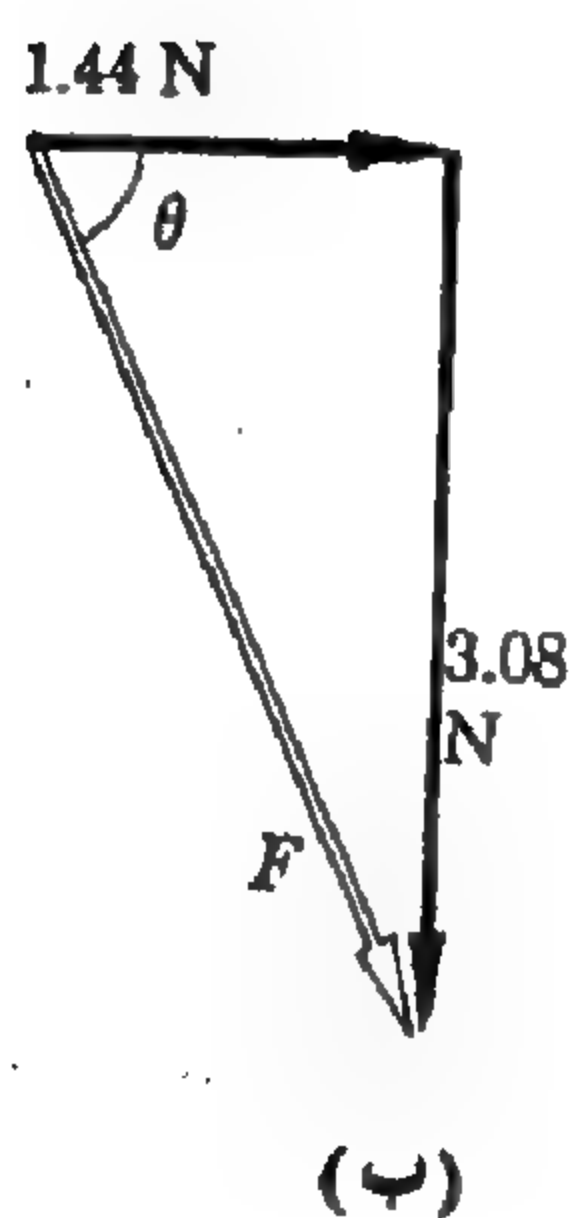
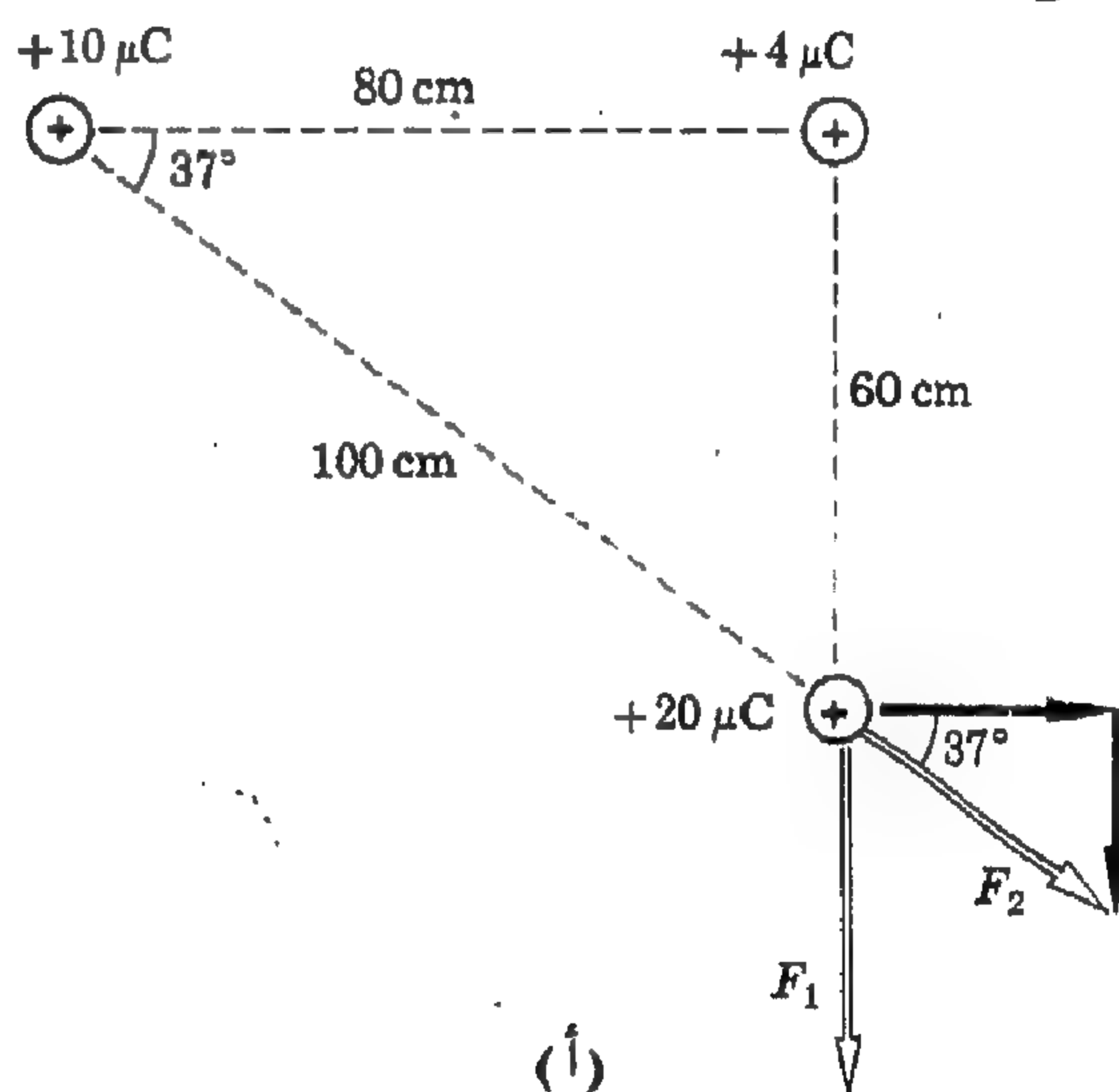
كما يوضح الشكل فإن هاتين القوتين تؤثران في اتجاهين متعامدين أي أننا نستطيع استعمال نظرية فيثاغورث لإيجاد القوة المحصلة على الشحنة $10\text{-}\mu\text{C}$.

$$\tan \theta = \frac{F_2}{F_1} = 3.00 \quad \text{و} \quad F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = 19 \text{ N}$$

ومنها نجد أن

$$\theta = 71.5^\circ$$

مثال توضيحي ١٦ - ٤ : أوجد القوة المؤثرة على الشحنة $+20\text{-}\mu\text{C}$ والمرسومة في الشكل ١٦ - ١٣



شكل ١٦ - ١٣
 القوى الموجهة التي تؤثر على
 الشحنة $20\text{-}\mu\text{C}$ تؤدي إلى
 ظهور محصلة F موضحة في
 الجزء ب

طريقة الحل : بتطبيق قانون كولوم ، نجد أن :

$$F_2 = 1.8 \text{ N}$$

$$F_1 = 2.0 \text{ N}$$

بتحليل F_2 إلى مركباتها فإن $F_{2x} = F_2 \cos 37^\circ = 1.44 \text{ N}$ ، $F_{2y} = 1.08 \text{ N}$ كما هو موضح والقوة الكلية في اتجاه y والمؤثرة على الشحنة $F_y = 2.0 + 1.08 = 3.08 \text{ N}$ وهي إلى أسفل أما القوة الكلية في اتجاه x فهي 1.44 N وهي إلى اليمين . وكلتا القوتين ممثلتان في الشكل ١٦ هـ ١٣ ب . من الواضح أن القوة المحصلة هي

$$\tan \theta = \frac{3.08}{1.44} = 2.14 \quad \text{و} \quad F = \sqrt{(1.44)^2 + (3.08)^2} = 3.4 \text{ N}$$

ومنها

$$\theta \approx 65^\circ$$

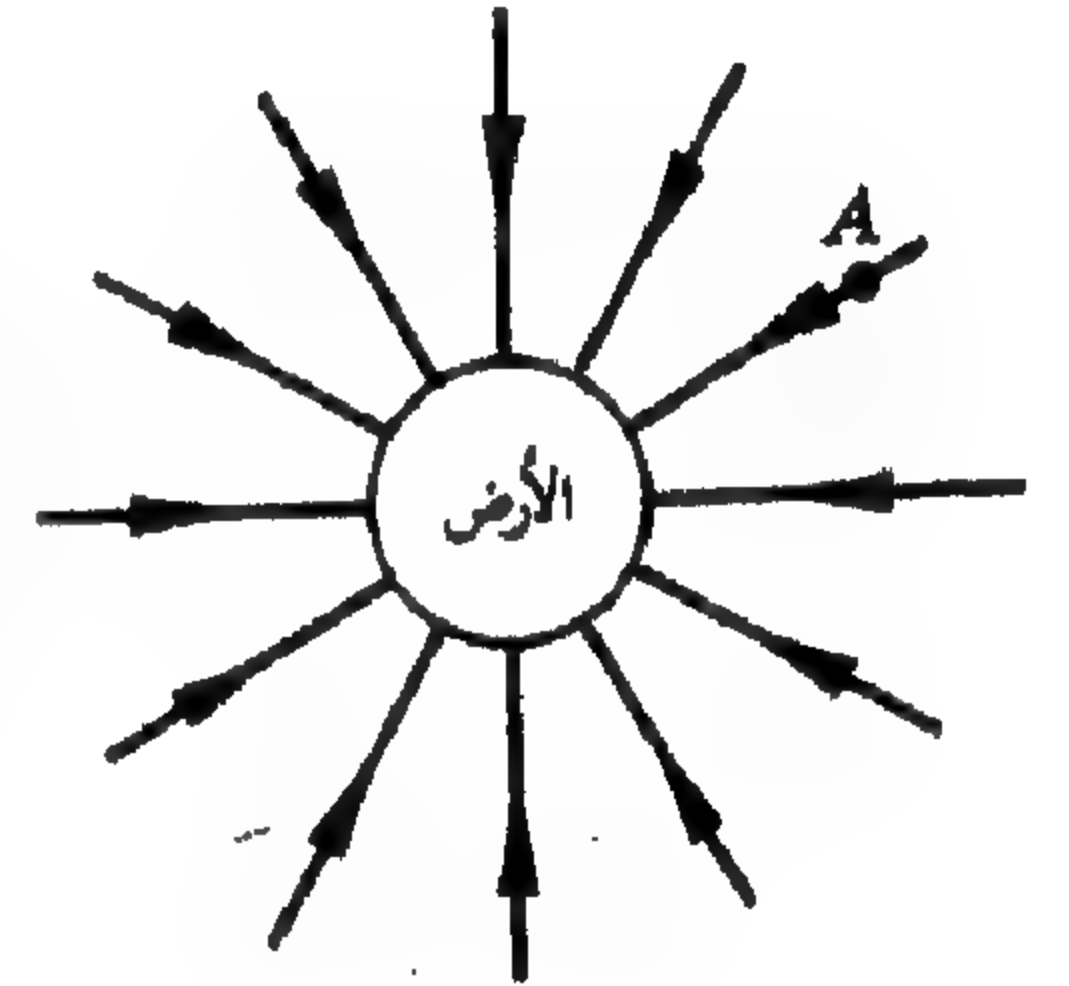
١٦ - ٨ المجال الكهربائي

سنجد من المناسب أن نناقش القوى الكهربائية بدلالة مفهوم يسمى المجال الكهربائي .

ويؤدي هذا المفهوم دورا في الكهرباء مثلما يؤدي مفهوم مجال الجاذبية دوره في الميكانيكا .

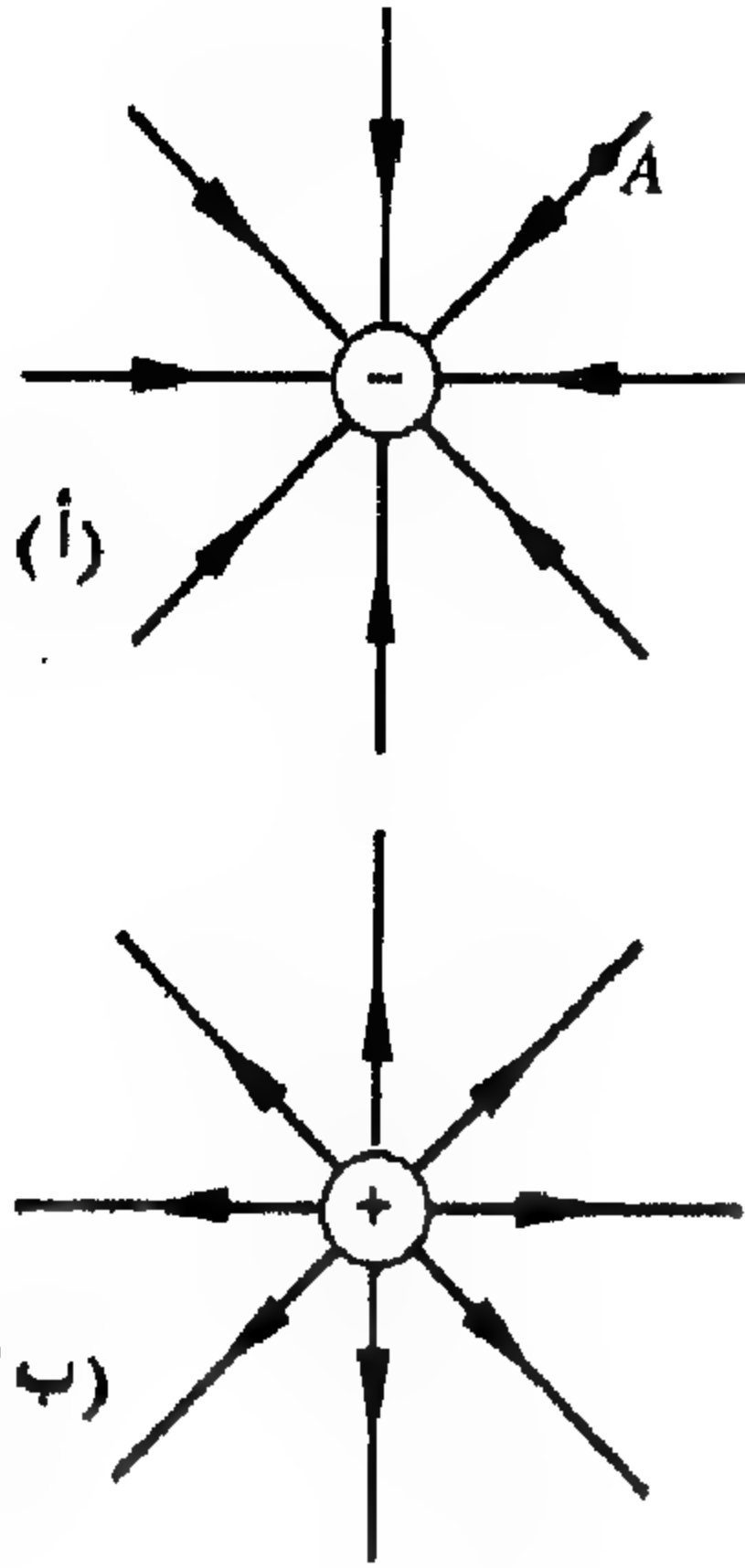
ومن الشائع على ألسنة الناس القول بأن حجرا اذا ترك فإنه يسقط إلى الأرض بسبب قوى الجاذبية الأرضية المتجهة الى أسفل . ويعنى الناس بهذا أن الحجر يجابه قوة الجاذبية وأن هذه القوة تجعله يتسارع وحين نبتعد عن الأرض متجهين نحو الفضاء فإن جاذبية الأرض للأشياء تصبح صغيرة جدا . وهنا نقول أن مجال جاذبية الأرض يصبح ضعيفا جدا حين نبعد لمسافات كبيرة عن الأرض . ومجال التجاذب (الجاذبية) يقال إنه موجود في منطقة من الفضاء حين تؤثر قوى جذب على جسم ما ، فإذا كان مجال الجاذبية كبيرا فإن قوة الجاذبية المؤثرة على كتلة ما تكون كبيرة .

من المناسب رسم صورة لمجالات الجاذبية . يوضح الشكل ١٦ - ١٤ مجال الجاذبية الأرضية ويمكن تفسير هذه الصورة على النحو التالي : لو وضع جسم ما عند النقطة A في الشكل فإنه سيعانى من قوة متجهة نحو مركز الأرض ، وتوضح خطوط القوة المرسومة في شكل ١٦ - ١٤ ، اتجاه مجال الجاذبية الأرضية . أى اتجاه قوة الجاذبية المؤثرة على الجسم .



حقيقة ، بالطبع ، يجب أن يرسم الشكل ١٦ - ١٤ في ثلاثة أبعاد بحيث تتجه خطوط القوة من كل جانب نحو مركز الأرض . يلاحظ هنا أن خطوط القوة لا تمثل اتجاه القوة فحسب بل تشير أيضا الى مقدار هذه القوة . وحيثما كان المجال ، أى قوة الجاذبية ، كبيرا فإن خطوط القوة تكون متقاربة . أما بعيدا عن الأرض ، حيث تكون الخطوط متباعدة ، فإن مجال الجاذبية يكون ضعيفا . ويشار في الكتب المدرسية المتقدمة ان هذه الصورة ليست فقط صحيحة من الناحية الكيفية ولكنها حقيقية تماما لكل من مجال الجاذبية والمجال الكهربائي .

يعرف المجال الكهربائي بطريقة مماثلة لمجال الجاذبية . لقد أصبح من المتفق عليه بشكل شامل تعريف اتجاه المجال الكهربائي بأنه اتجاه القوة الكهربائية التى تؤثر على شحنة اختبار موجبة صغيرة . وشحنه الاختبار هذه هى شحنة خيالية ذات مواصفات خاصة جدا : فهذه الشحنة لا تمارس أية قوة على الشحنات المجاورة وهى بهذا لاتسبب اضطرابا للشحنات المجاورة .



شكل ١٦ - ١٥
يتجه المجال الكهربى شعاعيا
الى الداخل نحو شحنة سالبة
صغيرة وشعاعيا الى الخارج
من ناحية شحنة موجبة
صغيرة .

ويمكننا من الناحية العملية - تقريب الشحنة الخيالية الى الأذهان باستخدام جسم صغير جدا يحتوى على شحنة صغيرة للغاية - وهذا الجسم سيسبب اضطرابا في الشحنات القريبة منه ولكن بقدر ضئيل ومهمل .

افترض الآن أن شحنة اختبار موجبة قد وضعت عند النقطة A في الشكل ١٦ - ١٥ . ستجذب هذه الشحنة الى الشحنة السالبة على طول الخط الشعاعى الموضح . ويعرف اتجاه المجال الكهربى عند A على أنه اتجاه القوة المؤثرة على شحنة اختبار موجبة . وكما نرى ، فإن المجال الكهربى بالقرب من شحنة سالبة يتجه شعاعيا للداخل نحو هذه الشحنة . ويمثل المجال الكهربى بخطوط المجال المبينة .

يوضح الشكل ١٦ - ١٥ ب المجال الكهربائى حول شحنة موجبة وتلاحظ أن اتجاه الأسهم المرسومة على خطوط المجال الكهربائى تبدو مبتعدة عن الشحنة وذلك لأن الشحنة الموجبة تتنافر مع شحنة الاختبار الموجبة . وتسمى الخطوط التى رسمناها في هذه الأشكال لتمثل القوة المؤثرة على شحنة الاختبار ، خطوط القوة الكهربائية ويمكننا التعميم على النحو التالى . تنبع خطوط القوة وتخرج من الشحنات الموجبة بينما تتجه نحو الشحنات السالبة وتنتهى عندها .

إننا نأمل أيضا أن نعرف شدة المجال الكهربائى بطريقة كمية . قلنا فيما سبق أن اتجاه المجال في نقطة ما هو القوة المؤثرة على شحنة اختبار موجبة موضوعة عند هذه النقطة محل السؤال . ومقدار أو شدة المجال الكهربائى تؤخذ على أنها القوة الكهربائيه F المؤثرة على شحنة اختبار دقيقة ، مقسومة على قيمة هذه الشحنة q . عند استعمال الرمز E للدلالة على شدة المجال الكهربائى فإن التعريف السابق يمكن كتابته على هيئة معادلة كما يلى :

$$E = \frac{F}{q} \quad (١٦ - ٣)$$

من الواضح أن وحدات شدة المجال الكهربائى هي نيوتن لكل كولوم ، ولو أن q كانت 1C لأصبحت كل من F و E متساويتين عدديا . ولهذا السبب فإننا سنتص دائما على أن : شدة المجال الكهربائى هي القوة المؤثرة على وحدة شحنة اختبار موجبة . على أنه يجب أن ندرك دائما أنه لقياس المجال تستعمل شحنة أصغر بكثير من 1C حتى لاتسبب اضطرابا للشحنات الأخرى الموجودة .

مثال توضيحي ١٦ - ٥ : أوجد شدة المجال الكهربائى على بعد 50cm من شحنة موجبة قدرها $10^{-4}C$

طريقة الحل : نريد أن نوجد المجال عند النقطة A في الشكل ١٦ - ١٦ ، وحيث أن المجال هو القوة على وحدة الشحنات الموجبة ، لذا فاتجاهه يكون الى اليمين كما يشير السهم . ولحساب مقدار المجال الكهربائي فإننا نستعين بقانون كولوم (وذلك بتخيل أننا وضعنا شحنة اختبار q_t عند A) . لدينا الآن :

$$F = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \left(\frac{q_1 q_2}{r^2} \right)$$

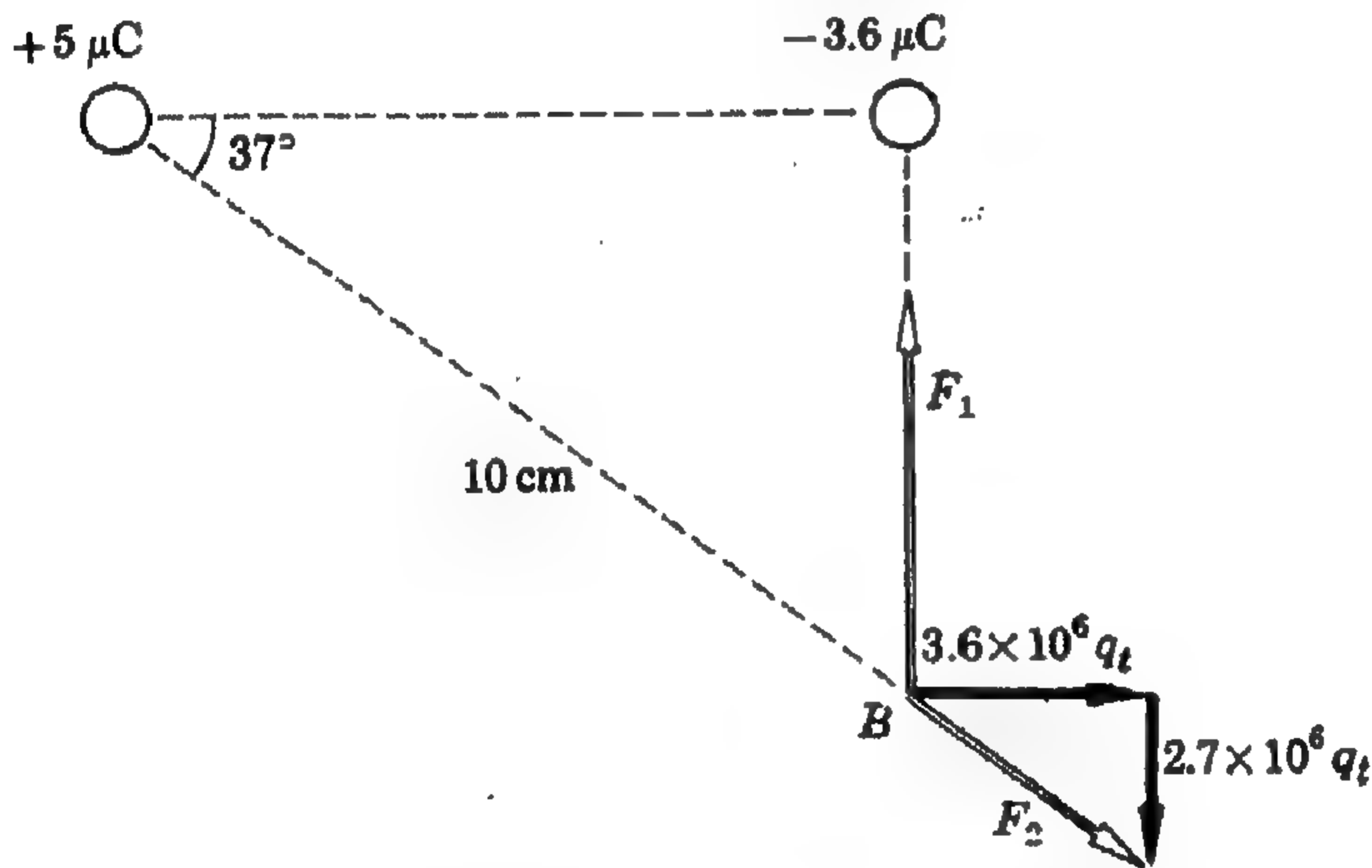
وفي حالتنا هذه ، $q_2 = q_t$ ، $q_1 = 10^{-4} \text{ C}$ ، $r = 0.5 \text{ m}$ ، وحيث أن $F/q_t = E$ فإننا نجد على الفور

$$E = (9 \times 10^9) \left[\frac{10^{-4}}{(0.50)^2} \right] = 3.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

عليك إثبات أن الإجابة ذات وحدات صحيحة .

مثال توضيحي ١٦ - ٦ . اوجد شدة المجال الكهربائي عند النقطة B في الشكل ١٦ - ١٧ .

طريقة الحل : تخيل أننا وضعنا شحنة اختبار موجبة q_t عند B ثم نقوم بحساب القوة المؤثرة عليها باستخدام قانون كولوم . وباستعمال المتجهات الموضحة



$$F_1 = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \left(\frac{3.6 \times 10^{-6} \text{ C}}{0.0036 \text{ m}^2} \right) q_t = 9 \times 10^6 q_t \text{ newtons}$$

وهكذا فإن ،

$$E_1 = (9 \times 10^6) \text{ N/C}$$

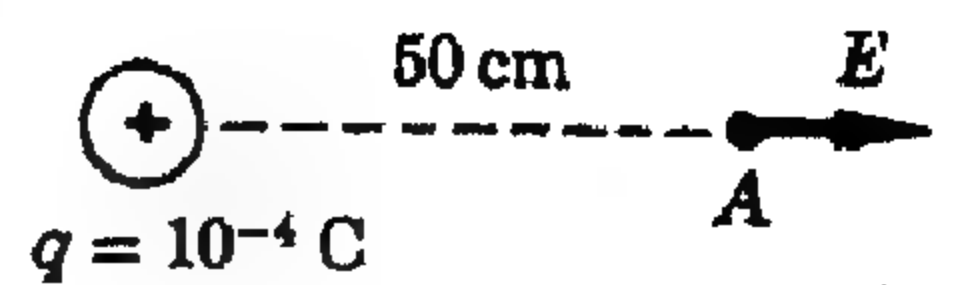
وبالمثل

$$E_2 = 4.5 \times 10^6 \text{ N/C}$$

ومن هذا باستخدام المركبات :

$$E_y = 9 \times 10^6 - 2.7 \times 10^6 = 6.3 \times 10^6 \text{ N/C} \quad E_x = 3.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 \quad E = 7.3 \times 10^6 \text{ N/C}$$



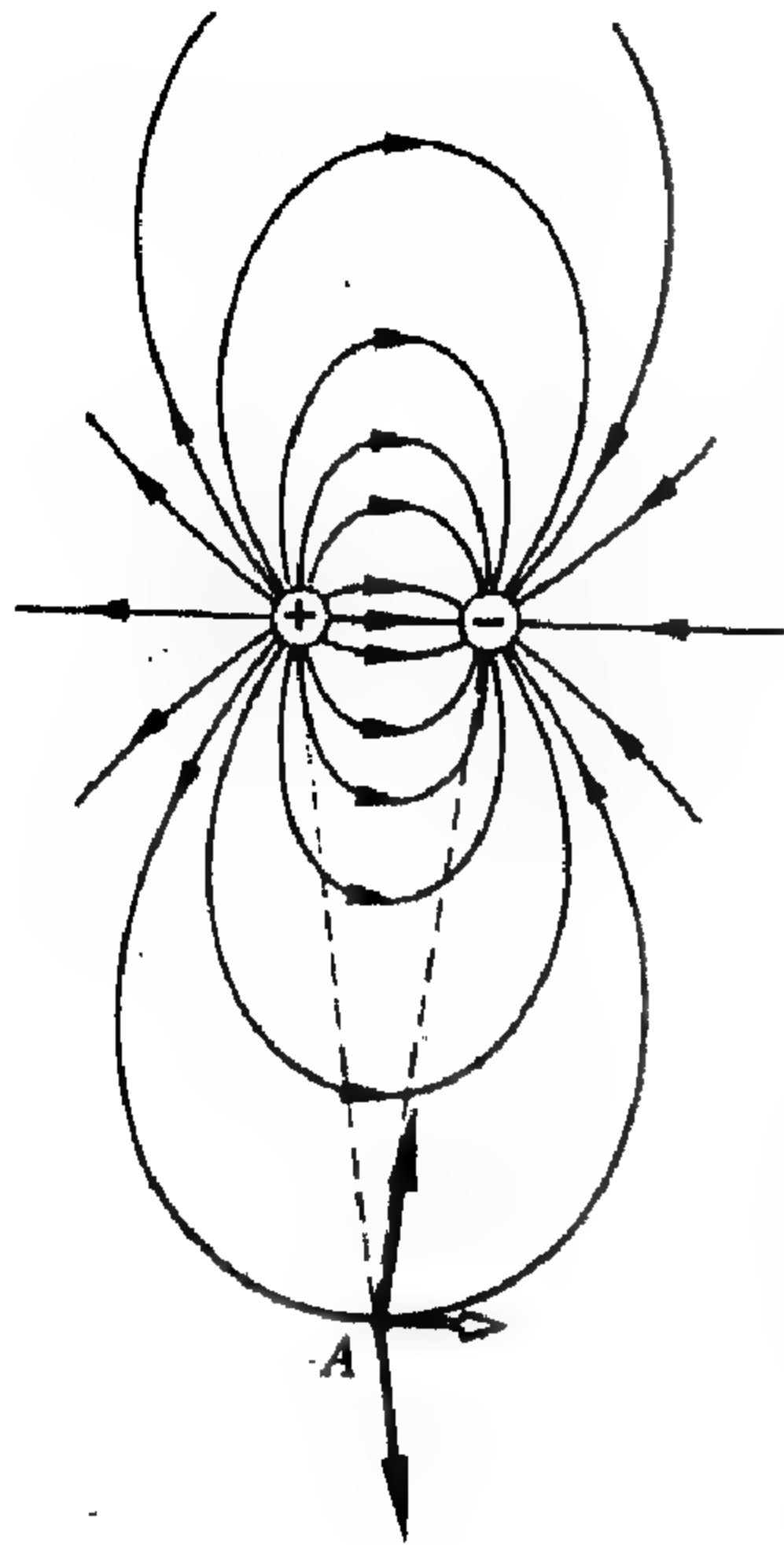
شكل ١٦ - ١٦

لكي نوجد المجال الكهربائي عند النقطة A ، فإن علينا أن نحسب القوة التي تؤثر على وحدة الشحنات الموجبة إذا وضعت عند تلك النقطة .

شكل ١٦ - ١٧

لايجاد المجال عند B فإننا يجب أن نجد القوى F_1 و F_2 التي تؤثر على شحنة الاحبار الموجبة q_t والموضوعة عند تلك النقطة .

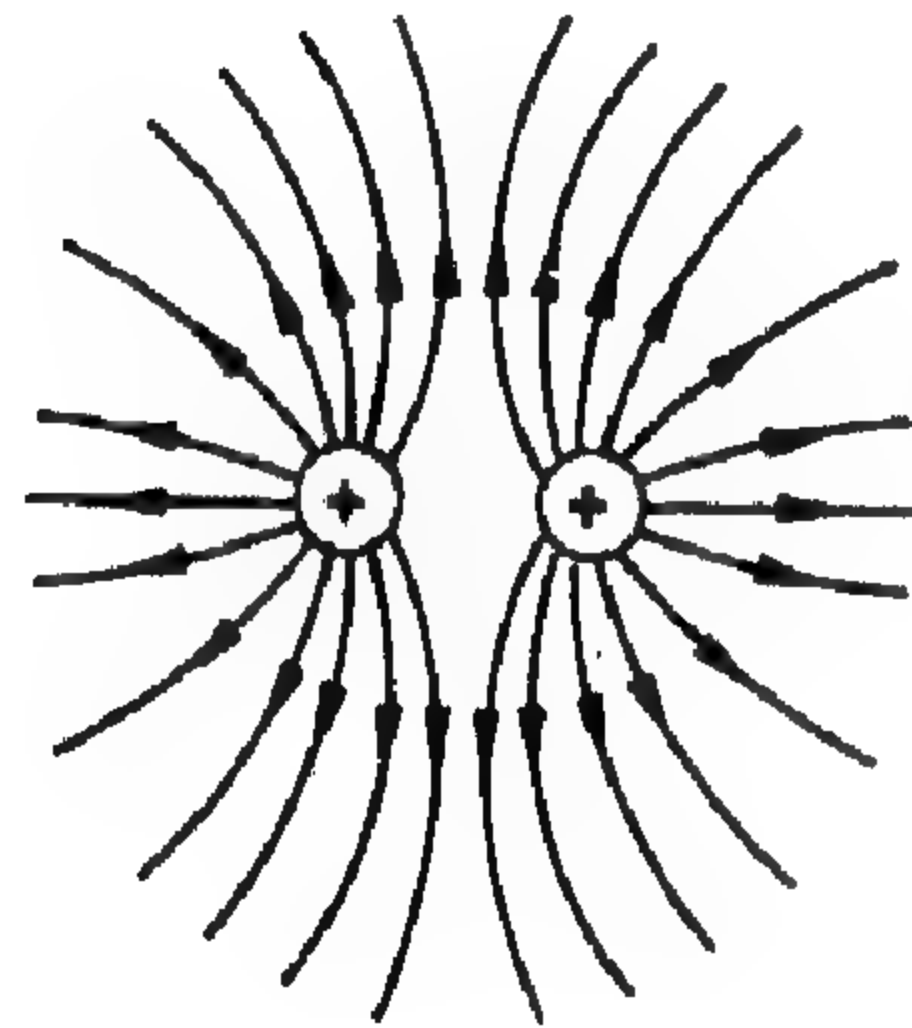
١٦ - ٩ المجال الكهربائي في أنظمة مختلفة



شكل ١٦ - ١٨
تتبع خطوط المجال الكهربائي
من على الشحنة الموجبة
وتنتهي على الشحنة السالبة

ان قدرا كبيرا من التعمق في موضوع ما يمكن الوصول اليه بدراسة تخطيط المجال الكهربائي الخاص به ، ولتبيان هذا دعنا نفحص عدة مجالات كهربائية وتوزيع الشحنات التي سببت هذه المجالات ، متذكزين دائما أن المجال الكهربائي قد عرف على أنه القوة المؤثرة على وحدة الشحنات الموجبة ، وأن خطوط القوة يجب أن ترسم دائما نابعة من الشحنات الموجبة متجهة الى الشحنات السالبة .

اعتبر المجال الكهربائي حول شحنتين متساويتين احدهما موجبة والاخرى سالبة كما هو موضح بالشكل ١٦ - ١٨ . سيكون المجال الكهربائي متشابها حول كل منهما فيما عدا أنه سيتجه الى الشحنة السالبة ، وخارجا من الشحنة الموجبة وهذا المجال مبين في الشكل ١٦ - ١٨ . وعليك أن تفحص نقاطا متعددة في الشكل حتى تقتنع أن شحنة الاختبار الموجبة تتأثر فعلا بقوة في الاتجاه المبين بخطوط القوة في الشكل . ولمعرفة كيف يتم هذا ، اعتبر نقطة A في الشكل ١٦ - ١٨ . إذا وضعت شحنة اختبار موجبة عند نقطة A فإنها ستتنافر مع الشحنة الموجبة وتنجذب الى الشحنة السالبة . وقوة التجاذب ستكون مساوية لقوة التنافر لأن شحنة الاختبار تبعد بنفس القدر عن كل من الشحنتين ، وتكون محصلة هاتين القوتين عبر خط القوة عند نقطة A .

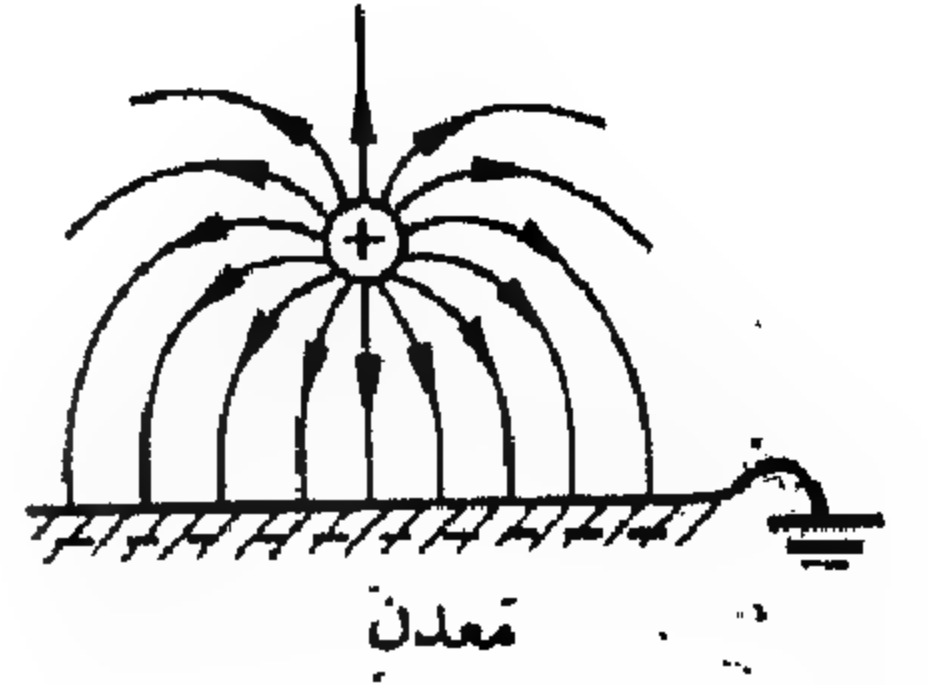


شكل ١٦ - ١٨
لاحظ كيف تظهر خطوط
القوة حول شحنتين متشابهتين
وكأنها تتدافع وتتنافر مع
بعضها البعض . لماذا يجب
أن يحدث الأمر هكذا ؟

هناك موقف مشابه وهو المجال بالقرب من شحنتين متشابهتين وهو مبين بالشكل ١٦ - ١٩ . يوضح هذا الشكل كما كان أيضا في الشكل ١٦ - ١٨ أن المجال يكون أكبر مايمكن حين تكون خطوط القوة متقاربة جدا مع بعضها البعض ، وهذه طريقة مناسبة لتقدير شدة المجال الكهربائي .

افترض الآن أن كرة مشحونة بشحنة موجبة منتظمة علقت فوق لوح معدني كبير . فلو أن اللوح المعدني كان متصلا بالأرض لجرت الشحنات منه (أو اليه) الى المعين الذي لاينضب للأرض ، ويوضح الشكل ١٦ - ٢٠ هذا الموقف . نلاحظ لأول وهلة أن الالكترونات في المعدن ستتنجذب بالشحنات الموجبة ، وعلى الرغم من انها لا تستطيع مغادرة اللوح ، الا انها ستتجمع على سطح اللوح تحت الشحنة الموجبة مباشرة ، وستقوم شحنات سالبة بالسريان من الأرض الى اللوح لكي تحل محل الالكترونات التي احتلت مواقعها بالقرب من مركز اللوح .

إن شحنة الاختبار الموجبة والمستخدمه لتحديد اتجاه المجال ستجذب وتدفع الى أسفل في اتجاه اللوح في المنطقة المركزية ويمكنك بسهولة التحقق من أن خطوط القوة



شكل ١٦ - ٢٠

تقوم الشحنة الموجبة بجذب الشحنات السالبة نحو قمة اللوح المعدني . لماذا كانت خطوط المجال عمودية على اللوح عند سطحه ؟

المرسومة في الشكل ١٦ - ٢٠ تمثل في الواقع القوة المؤثرة على شحنة الاختبار الموجبة . وبالمثل فإن كثافة الخطوط تشير الى شدة المجال وكما هو متوقع يكون المجال أشد ما يمكن بالقرب من الشحنة الموجبة .

هناك سمتان دقيقتان وهامتان للشكل (١٦ - ٢٠) ويجب الإشارة اليهما . أولهما أن خطوط القوة لا تنفذ داخل اللوح المعدني وإنما تتوقف جميعها عند السطح مما يشير الى أن المجال الكهربائي داخل المعدن صفر ، أى أنه لا توجد قوة تؤثر على الشحنة داخل المعدن . ويمكن فهم هذا الموقف في ضوء التحليل التالي : سنعتبر ظروفًا الكهروستاتيكية أى أنه لا يوجد فيض مستمر للشحنة ، فلو أن هناك مجالًا داخل المعدن إذن لأثر بقوة على الإلكترونات الحرة داخل المعدن ولتحركت هذه الإلكترونات مسببة تيارًا كهربائيًا ولكننا لا نلاحظ أية تيارات تحت الظروف الكهروستاتيكية ، ولذا فالمجال الكهربائي يجب أن يكون صفرًا داخل معدن ما .

تتعلق النقطة الثانية بحقيقة أن خطوط القوة متعامدة مع سطح المعدن . سنشير أولاً الى أن خطوط القوة تمثل القوة المؤثرة على شحنة موجبة ، أى أن الشحنات السالبة ستدفع في الاتجاه المعاكس . في الشكل ١٦ - ٢٠ تتأثر الإلكترونات السالبة الشحنة وهي عند سطح المعدن بقوة تحاول أن تجذبها الى أعلى نتيجة للتجاذب مع الشحنة الموجبة المعلقة فوق المعدن . ولكن الإلكترونات حبيسة داخل جسم المعدن ولا تستطيع التحرر تحت تأثير هذه القوة .

افترض الآن أن القوة لم تكن عمودية بالضبط على سطح المعدن أى أن لها مركبة موازية لسطح المعدن . ولما كانت الإلكترونات قادرة على الحركة في ذلك الاتجاه ، فإنها تستطيع أن تتأثر بمركبة القوة وتتحرك مسببة تيارًا كهربائيًا ولكن الظروف كما قلنا هي ظروف الكهروستاتيكية لذا فلا تيار يمر وعليه فإنه لا توجد مركبة للمجال الكهربائي في محاذاة سطح المعدن . ونستنتج أن المجال متجه عمودياً على سطح المعدن .

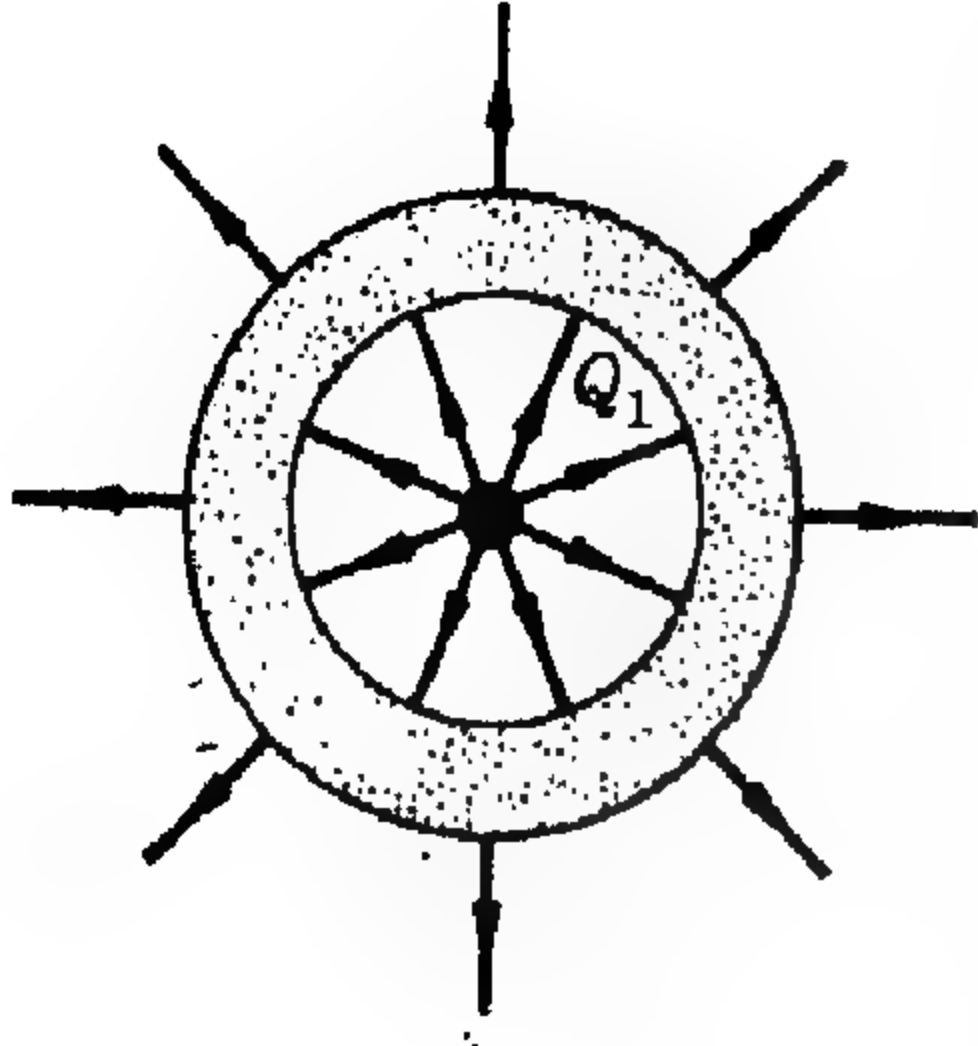
سنعود مرة أخرى الى استعمال هذه الحقائق لأنها تعتبر حقائق عامة في أية مشكلة من مشاكل الكهربية الساكنة ، لذا سنذكرهم بالنص مرة أخرى . تحت ظروف الكهروستاتيكية .

فإن :

١ - يكون المجال الكهربائي داخل معدن ما صفرًا

٢ - يكون المجال الكهربائي خارج سطح المعدن مباشرة عمودياً على السطح

حيث أن هذه الحقائق قد تم برهانها بالرجوع الى حركة الإلكترونات الحرة داخل معدن لذا فالبراهين المستخدمة لن تصلح للعوازل التي لا تحوى إلكترونات حرة . وعليه فالقواعد السابقة تنطبق فقط في حالة المعادن وليس للعوازل .



شكل ١٦ - ٢١

تكون شحنة Q_1 - على
السطح الداخلي للمعدن: هل
يمكن أن يكون هذا صحيحا
حتى في غياب هذه الدرجة
العالية من التماثل والتي
استخدمت هنا ؟

مثال توضيحي ١٦ - ٧ : وضع بالرسم مستخدما خطوط القوة أن شحنة معلقة داخل تجويف معدني تحدث شحنة مساوية ومعاكسة في الإشارة على السطح الداخلي .

طريقة الحل : لنفرض ان الجسم المعدني مثل كما هو في الشكل ١٦ - ٢١ . نخرج خطوط القوة من الشحنة الموجبة Q_1 والتي علقنا في التجويف . ولما كان المجال الكهربائي داخل المعدن يجب أن يكون صفرا تحت الظروف الالكتروستاتية كالتي لدينا لذا وجب أن تقف خطوط القوة الصادرة عن Q_1 عند اصطدامها بـ سطح المعدن . وتكون هيئتها كما في الشكل . ولكن هذا يعني أن السطح الداخلي سيكتسب شحنة سالبة لأن خطوط القوة تتجه دائما الى الشحنات السالبة وتنتهي عندها . وبالإضافة الى هذا ، لما كان عدد خطوط القوة الصادرة عن Q_1 مساويا لعددها الذي ينتهي عند الشحنة السالبة لذا يمكن القول بأن شحنة السطح الداخلي هي $-Q_1$

لو أن الجسم المعدني كان متعادلا قبل وضع Q_1 في التجويف ، ولو أنه لم يسمح لأية شحنة أن تزيد أو تنقص من الجسم المعدني ، لظل الجسم بدون شحنة صافية . لهذا فان شحنة $Q_1 +$ يجب أن تظهر على الأجزاء الخارجية للجسم . هل يمكنك - باستخدام خطوط القوة - أن تثبت أن الشحنة الموجودة على السطح الخارجي تكون بالصورة الموضحة ؟ هل يمكنك إثبات أن النتائج التي وصلنا اليها هنا لا تعتمد على شكل الجسم أو التجويف ؟

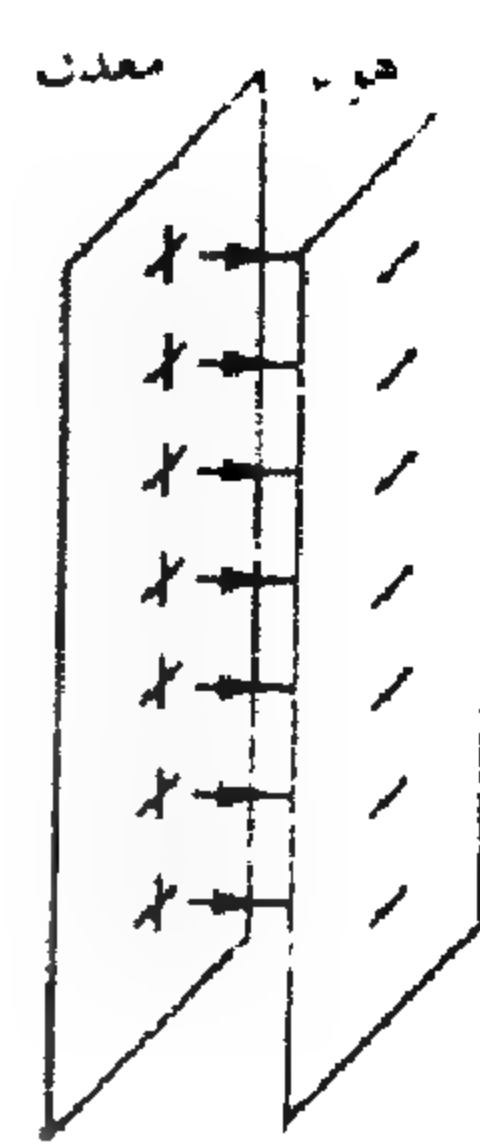
١٦ - ١٠ طاقة الوضع الكهربائية :

فرق الجهد

عند مناقشة حركة جسم من مكان الى آخر داخل مجال للجاذبية فإننا استعملنا مفهوم طاقة وضع الجاذبية PE . لو نتذكر أننا قد عرفنا الفرق في PE بين نقطتين على أنه الشغل المبذول في تحريك جسم من نقطة الى النقطة الأخرى . والأكثر من هذا أن المسار الذي يتحرك عبره الجسم من نقطة الى أخرى لم تكن له أية متطلبات : فالشغل المبذول وتبعاً لذلك الفرق في طاقة الوضع هي نفسها لجميع المسارات . وقد سمى مجال الجاذبية بأنه مجال احتفاظي لأن له هذه الخاصية .

ويتكرر نفس الموقف في الكهرباء . اعتبر مجالا كهربائيا بين لوحين مشحونين . (يمكن شحن اللوحين عن طريق توصيلها بطرفي البطارية كما سنرى فيما بعد . يقوم الطرف الموجب للبطارية بوضع الشحنات الموجبة على اللوح المتصل به وتكتسب شحنة سالبة على اللوح المتصل بالطرف السالب للبطارية) ويبين الشكل ١٦ - ٢٢ هذين اللوحين . سنعتبر أن أبعاد اللوحين هائلة جدا بالمقارنة مع المسافة بينهما بحيث يصبح تأثير حواف الألواح مهملا في المنطقة المركزية للمجموعة . يوضح الجزء أ من

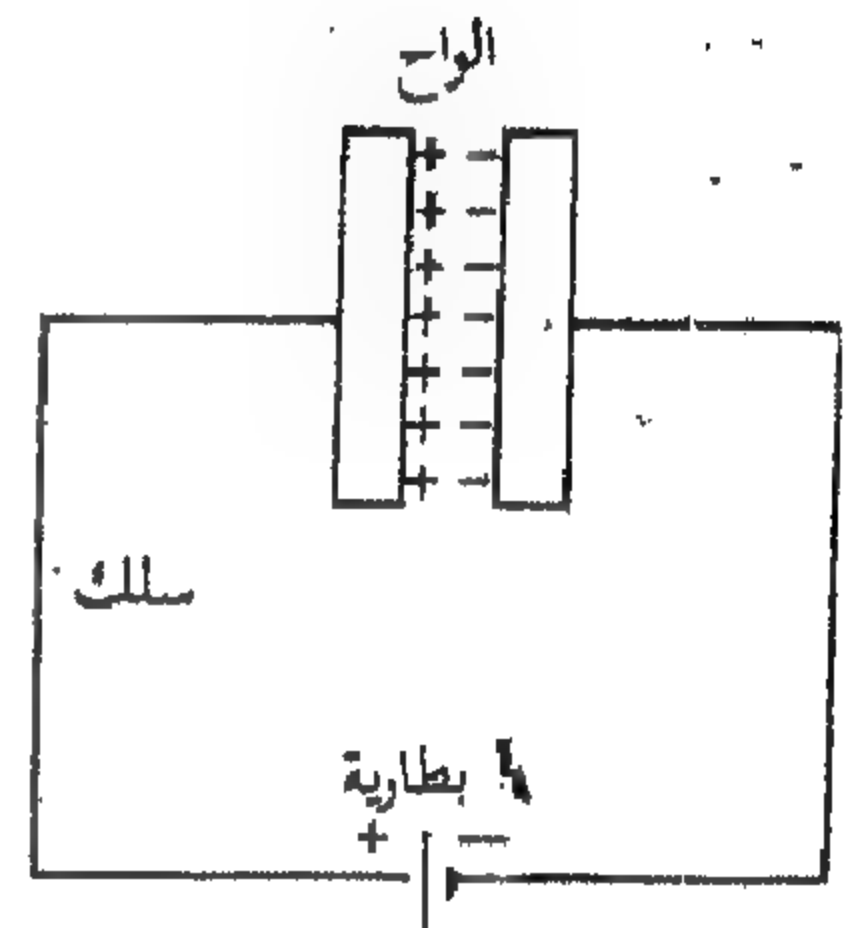
الشكل ١٦ - ٢٢ منظرًا عن قرب لجزء من اللوحين بينما يوضح الجزء ب الدائرة الكاملة .



(أ)

إذا ما تجاهلنا تأثيرات حواف الألواح فإنه بوضع شحنة اختبار موجبة بين الألواح ستلقى هذه الشحنة قوة مبتعدة عن اللوح الموجب و متجهة نحو اللوح السالب ويكون المجال الكهربائي E منتظما وفي الاتجاه المبين في شكل ١٦ - ٢٢ أ ، ج . أما عند الحواف فإن شكل المجال يكون تقريبا كما هو موضح في شكل ١٦ - ٢٢ ح وتسمى الأداة متوازية اللوحين من هذا النوع العام مكشفا .

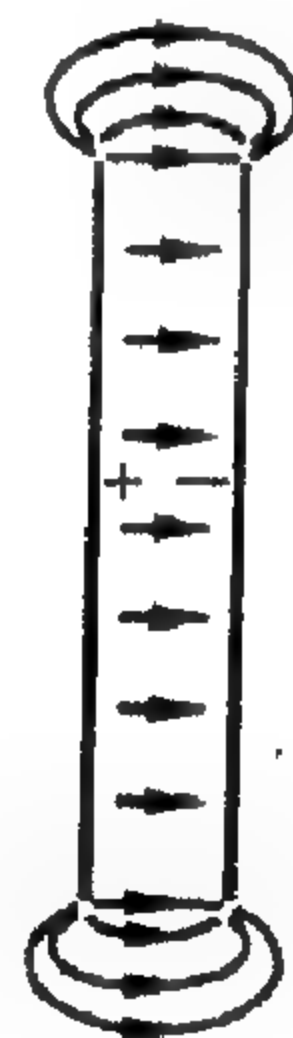
افترض الآن أن وحدة شحنة اختبار موجبة ، أى شحنة اختبار خيالية ، قد وضعت بين لوحى المكثف حيث تتعرض لقوة مقدارها E نحو اليمين (القوة E هي باعتبار أن المجال الكهربائي هو القوة المؤثرة على وحدة الشحنات الموجبة) هناك شغل سيبدل لتحريك شحنة الاختبار من مكان إلى مكان داخل المجال ، ويمكننا حساب الشغل المبذول في تحريك وحدة شحنة اختبار موجبة من النقطة A إلى عدة مواقع أخرى بين اللوحين وذلك بالرجوع إلى الشكل ١٦ - ٢٣ .



(ب)

لكي تقوم قوة بتحريك وحدة شحنة موجبة من A إلى B في الشكل ١٦ - ٢٣ فإنه تلزم قوة E لجذبها وذلك لمعادلة المجال الكهربائي ، وعليه فالشغل المبذول في حمل وحدة شحنة الاختبار الموجبة من A إلى B هو (القوة) \times (المسافة) أو سنعرف هذا الشغل على أنه فرق الجهد بين النقطتين A و B وبشكل عام يكون فرق الجهد من النقطة A إلى النقطة B هو الشغل المبذول في حمل وحدة شحنة اختبار موجبة من A إلى B ، باستخدام الرمز V_A للجهد عند النقطة A فإنه يصبح لدينا في الحالة الخاصة لمنطقة يكون فيها E ثابتا :

تعريف



(ج)

$$V_B - V_A = Ed \quad \text{فرق الجهد في مجال منتظم} \quad \text{مجال ثابت (١٦ - ٤)}$$

وواحدات V هي نيوتن - متر لكل كولوم . ولكن الشغل هو حاصل ضرب القوة والمسافة لذا فإن نيوتن \times متر هي اجول . أى أن V لها وحدات جول لكل كولوم وهذه الوحدة تسمى فولت Volt (وتختصر بالحرف V . ويقاس فرق الجهد بالفولت

لقد أصبح من المعتاد أن نقول أن نقطة مثل B تقع عند جهد أعلى من النقطة A أى أن وحدة شحنة الاختبار الموجبة يجب أن تسحب من A إلى B ، وعليه بالتشابه مع حالة الجاذبية تقع B أعلى التل بالنسبة إلى A أو عند جهد أعلى من جهد A . نلاحظ أيضا أنه لو اطلقت شحنة موجبة عند B لتسارعت نحو A فالمجال الكهربائي E يؤثر بقوة على الشحنة وتقع الشحنة تحت تأثير هذه القوة . وهناك تشابه وثيق بين

شكل ١٦ - ٢٢

حين توصل بطارية بلوحين معدنيين كما في (ب) فإن مجالا كهربائيا ينشأ بين اللوحين كما هو موضح في (أ) ، (ج) .

جسم يسقط من مكان ذي جهد مرتفع الى جهد أقل تحت تأثير مجال الجاذبية وانحدار الشحنة تحت تأثير المجال الكهربائي .

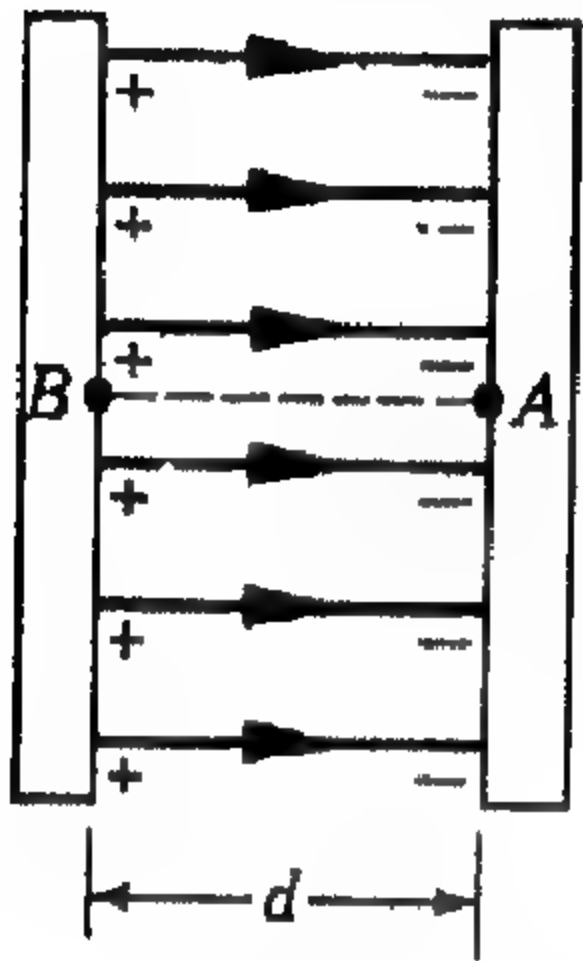
ولنتأكد مرة أخرى أن فرق الجهد بين نقطتين A و B ، $V_B - V_A$ هو عبارة عن الشغل المبذول في حمل وحدة الشحنات الموجبة من النقطة A الى النقطة B . ويعبر عن هذا الشغل بوحدات جول لكل كولوم أو بشكل عام بالفولت . إذا لم تكن الشحنة المحمولة من A الى B هي وحدة الشحنات الموجبة وإنما شحنة أخرى q فإن الشغل المطلوب سيكون :

$$\text{الشغل} = (V_B - V_A)q \quad ١٦ - ٥ \quad \text{العلاقة بين الشغل وفرق الجهد}$$

ويختزن هذا الشغل في النظام على هيئة طاقة وضع كهربائية .

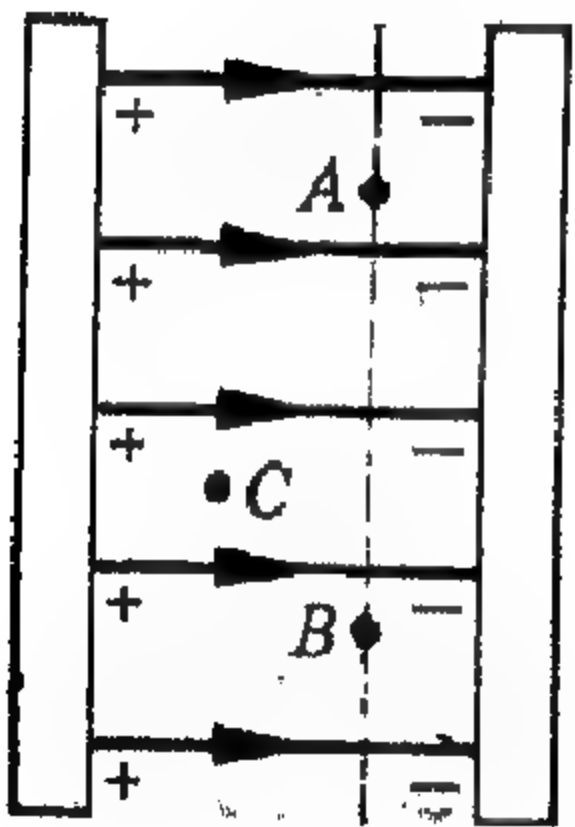
بالرجوع ١١ : شكل ١٦ - ٢٤ على نفس الصفحة ، ما هو مقدار الشغل الذي علينا بذله لتحريك شحنة اختبار موجبة من A الى B ؟ لكي نمسك بالشحنة في مكانها فإننا يجب ان نؤثر عليها بقوة الى اليسار . وهذه القوة ضرورية للإتزان مع تأثير قوة المجال الكهربائي على شحنة الإختبار . ولكن اذ حركنا الشحنة من A الى B ، فإن قوة الإتزان لن تبذل شغلا لأن اتجاه الحركة عمودى على اتجاه القوة . أى اننا بالفعل لا نحتاج لبذل أى شغل لتحريك الشحنة في اتجاه عمودى على المجال الكهربائي . وعلى ذلك لا يوجد فرق للجهد بين النقطتين A و B في الشكل ١٦ - ٢٤ . وفي الحقيقة فإنه يجب أن يكون واضحا أن جميع النقط الواقعة على الخط المنقطع المار خلال A و B تكون عند نفس الجهد . ويسمى هذا الخط ذو الجهد الثابت بخط متساوى الجهد . بل أن المستوى الذى يقع فيه هذا الخط ويكون موازيا للوح يكون مستوى ذا جهد ثابت ويسمى مستوى متساوى الجهد . ولا يبذل شغل عند تحريك شحنة على طول خط متساوى الجهد أو مستوى متساوى الجهد لأن مثل هذه الحركة تكون دائما متعامدة مع خطوط القوة أى مع المجال الكهربائي . وبالعكس فان خطوط القوة تكون دائما متعامدة مع خطوط متساوية الجهد .

هناك عدد لانهاى من خطوط ومستويات الجهد بين اللوحين في الشكل ١٦ - ٢٤ وليس من الصعب إثبات أنه لا يبذل شغل صافى حين تحرك شحنة على طول مسار يبدأ وينتهى عند نفس خط أو مستوى متساوى الجهد . هل يمكنك إثبات ذلك ؟ ويمكن استخدام نفس التحليل لإثبات أن الشغل المبذول في حمل شحنة من A الى نقطة مثل C في شكل ١٦ - ٢٤ لا يعتمد على المسار الذى تم خلاله الشغل . وعلى ذلك نستنتج أن المجال الكهربائي الساكن هو مجال احتفاظى وان فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين يكون ثابتا وغير معتمد على المسار المجال الاحتفاظى الذى اعتبر عند حساب فرق الجهد .



شكل ١٦ - ٢٣

حيث أن الشغل المطلوب بذله لحمل وحدة الشحنات الموجبة من A الى B هو Ed . لذا فإن فرق الجهد بين اللوحين هو Ed



شكل ١٦ - ٢٤

تقع النقطتان A و B على خط تساوى الجهد .

مثال توضيحي ١٦ - ٨ : استخدمت بطارية 20V لشحن لوحى المكثف الموضح في شكل ١٦ - ٢٤ . ما هو مقدار المجال الكهربائي بين اللوحين ؟ المسافة بين اللوحين هي 0.1cm (تقوم البطارية بجعل فرق الجهد بين اللوحين يصل الى 20V) .
طريقة الحل : حسب التعريف السابق فإن فرق الجهد بين اللوحين وهو 20V يعنى أن 20J من الشغل تلزم لنقل 1C من شحنة الاختبار من أحد اللوحين الى الآخر .
 وحيث أن القوة المؤثرة على وحدة شحنة اختبار هي شدة المجال E ، ولما كانت E ثابتة فان لدينا :

$$\frac{\text{الشغل}}{\text{الشحنة}} = \frac{\text{القوة}}{(d) \times (\text{الشحنة})}$$

$$20 \text{ V} = (E)(0.10 \times 10^{-2} \text{ m})$$

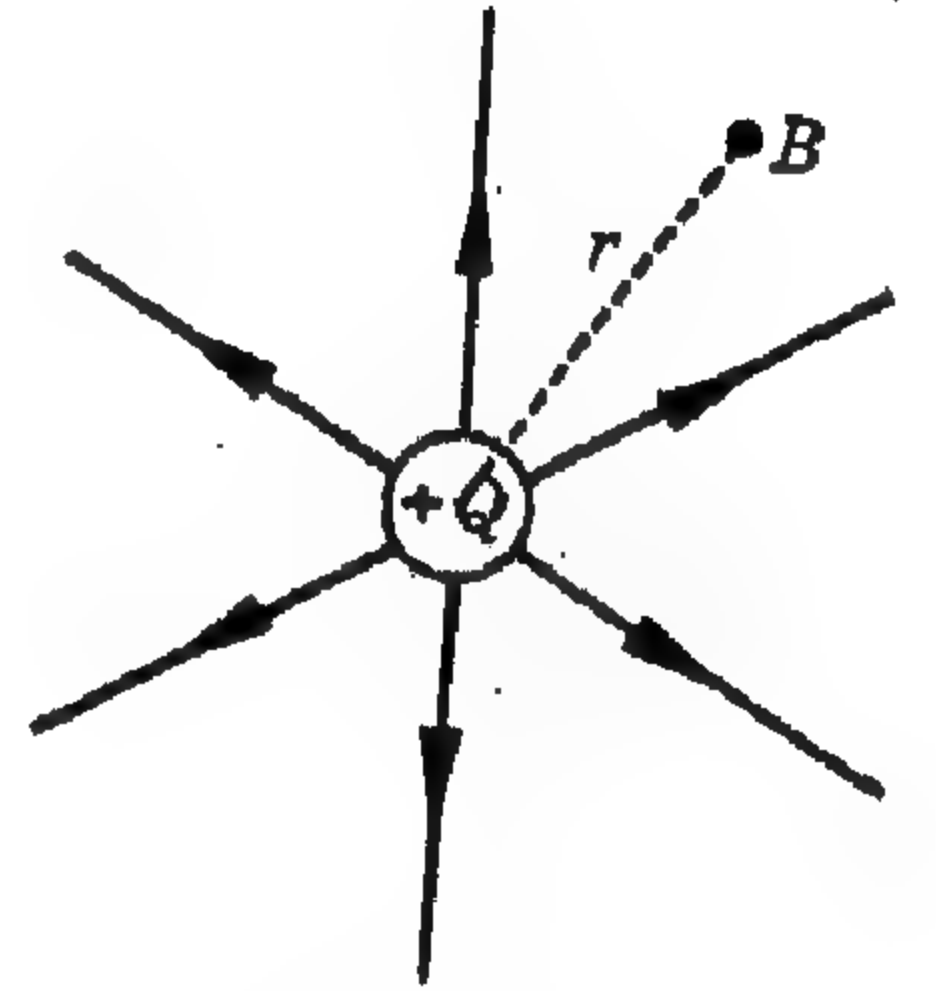
$$E = 20,000 \text{ V/m}$$

الوحدات فولت لكل متر (V/m) تكافئ الوحدات المستخدمة سابقا وهي نيوتن لكل كولوم newtons/coulomb هل تستطيع توضيح هذا ؟

١٦ - ١١ الجهود المطلقة

لقد اهتمنا حتى الآن بالفرق في الجهد فقط وسبب هذا ، كما هو الحال في جهود الجاذبية ، أن اختيار موضع الصفر لطاقة الوضع PE هو مسألة ملائمة لا أكثر. فطاقة وضع الجاذبية يمكن قياسها بالنسبة الى أية نقطة نختارها : سطح منضدة مثلا ، الأرض ، قمة بناء ما ، أو أى مكان آخر . وبالمثل فإنه في مسائل طاقة الوضع الكهربائية PE يكون موقع الصفر لطاقة الوضع مسألة اختيار بحث . وفي نظرية الدوائر الكهربائية يمكن توصيل أحد الأسلاك بالأرض وذلك بلحامه مع أنبوبة المياه .. وتصبح هذه النقطة هي التي فيها طاقة الوضع صفرية . وفي حالات أخرى يمكن اختيار مواقع أخرى يكون فيها الجهد الكهربائي صفرا .

حين نتناول الذرات والجزيئات فنحن دائما نحدد صفر طاقة الوضع الكهربائية بطريقة مختلفة . ولتوضيح هذه الطريقة في تناول الموضوع سنرجع الى شكل ١٦ - ٢٥ حيث نرى كرة مشحونة بشحنة قدرها +Q . قد تكون هذه الكرة بمثابة بروتون مثلا (البروتون هو نواة ذرة الأيدروجين ويحمل شحنة قدرها $e = +1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) ومن المعتاد في مثل هذه الحالات أن يعتبر صفر طاقة الوضع الكهربائية على مسافة لانهاية بعيدا عن الشحنة ، ولتر الآن نتائج هذا الاختبار .



شكل ١٦ - ٢٥

يعرف الجهد المطلق عند B على أنه الشغل المبذول في حمل وحدة شحنة اختبار موجبة من ما لانهاية حتى B

اعتبر النقطة B في شكل ١٦ - ٢٥ التي تقع على بعد نصف قطر قدره r من مركز تعريف الشحنة يعرف الجهد المطلق عند B على أنه الشغل المبذول في حمل وحدة شحنة الجهد المطلق اختبار موجبة من مالا نهاية الى النقطة B .

وعمليا فنحن نفعل الاتي : لقد ناقشنا الأمور حتى الآن بدلالة فرق الجهد ، $V_B - V_A$ ، على أننا الآن نعتبر النقطة A موضوعة في المالا نهاية ، ثم نعتبر أن الجهد في المالا نهاية . صفرا بحيث أن $V_A = 0$ وتصبح V_B هي الجهد المطلق عند B . نلاحظ هنا بعناية انه عندما نتحدث عن الجهد المطلق عند نقطة ما فنحن في الحقيقة نتحدث عن فرق الجهد بين المالا نهاية وتلك النقطة .

من السهولة بمكان الحصول على تعبير يعطى الجهد المطلق خارج شحنة معزولة منفردة كالتي ترى في الشكل ١٦ - ٢٥ . نحتاج هنا الى حساب الشغل اللازم بذله لحمل وحدة شحنة الاختبار من مالا نهاية حتى النقطة B على سبيل المثال . وليست الحسابات هنا بنفس السهولة التي أوجدنا بها فرق الجهد للوحين المتوازيين حيث كان المجال ثابتا وبالتالي كانت القوة ثابتة وكان فرق الجهد ببساطة هو Ed .

أما في الحالة الراهنة فتزداد شدة E كلما اقتربنا من B وعند المالا نهاية تكون E صفرا . ومن الواضح أن قيمة E تتغير وكذلك القوة المؤثرة على شحنة الاختبار عندما نحضرها من مالا نهاية ، وعلى الرغم من هذه الحقيقة إلا أن الشغل المبذول في احضار شحنة الاختبار من مالا نهاية الى النقطة B لازال يحسب بسهولة باستخدام حساب التفاضل والتكامل . سنقوم هنا بذكر النتيجة فقط . الجهد المطلق V ، عند النقطة B في الشكل ١٦ - ٢٥ نتيجة لوجود الشحنة $+Q$ أي الشغل المطلوب لحمل وحدة الشحنات الموجبة من مالا نهاية حتى النقطة B هو

$$V = k \frac{Q}{r}$$

أو $V = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \left(\frac{Q}{r} \right)$ (١٦ - ١) جهد الشحنة النقطية

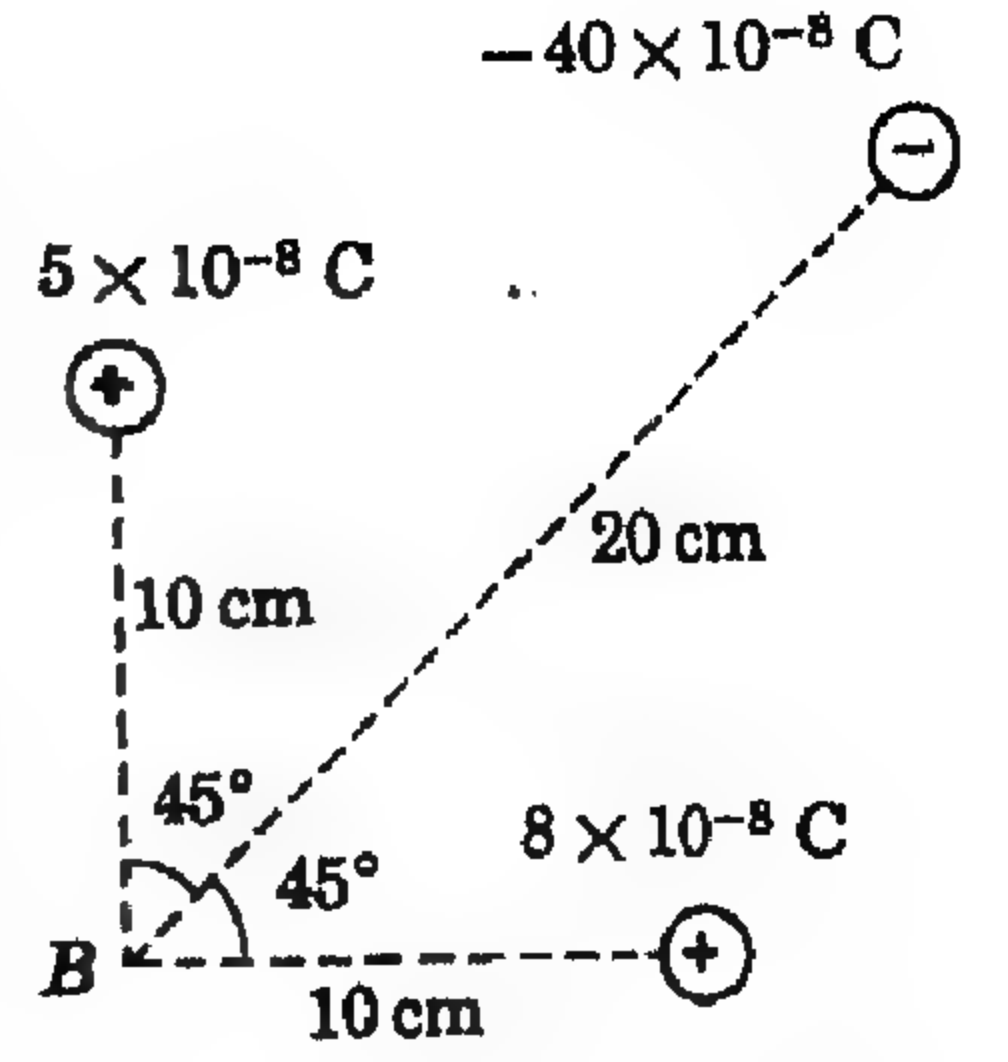
وتنطبق هذه المعادلة ، مثل قانون كولوم ، في حالة شحنات نقطية أو كرات منتظمة الشحنة فقط . أما في الحالات الأخرى فإن المسافة r لا تكون عادة محددة بدقة .

مثال توضيحي ١٦ - ٩ احسب الجهد المطلق عند النقطة B في شكل ١٦ - ٢٥ إذا كانت $Q = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$ ، $r = 50 \text{ cm}$ طريقة الحل : من المعادلة (١٦ - ١) فإن لدينا مباشرة

$$V = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \left(\frac{5 \times 10^{-6} \text{ C}}{0.50 \text{ m}} \right) = 90,000 \text{ V}$$

تحقق من الوحدات المعطاة مع الإجابة
مثال توضيحي ١٦ - ١٠ . احسب الجهد المطلق عند النقطة B التي تقع بجوار الشحنات الثلاثة الموضحة في شكل ١٦ - ٢٦ .

طريقة الحل : حين تحمل وحده شحنة اختبار موجبة من مالا نهاية الى النقطة B فإن شغلا يبذل ضد ثلاث قوى منفصلة . فهناك شغل مبذول ضد التنافر مع شحنتين موجبتين بينما تميل الشحنة السالبة ، بالطبع ، الى جذب شحنة الاختبار الموجبة نحو B . لذا فالشغل المبذول يتكون من كميتين موجبتين من الشغل ، بذلتا ضد تنافر الشحنات الموجبة وكمية سالبة من الشغل الذي يبذل على شحنة الاختبار نتيجة جذب الشحنة السالبة لها . وكل من هذه الكميات يمكن ايجاده باستخدام المعادلة (١٦-٦)



شكل ١٦ - ٢٦
اوجد الجهد المطلق عند النقطة B .

الشغل الناشئ عن الشحنة $+5 \times 10^{-8}$ هو $V_1 = (9 \times 10^9) \left(\frac{5 \times 10^{-8}}{0.10} \right) = 4500 \text{ V}$

الشغل الناشئ عن الشحنة $+8 \times 10^{-8}$ هو $V_2 = (9 \times 10^9) \left(\frac{8 \times 10^{-8}}{0.10} \right) = 7200 \text{ V}$

الشغل الناشئ عن الشحنة -40×10^{-8} هو $V_3 = -(9 \times 10^9) \left(\frac{40 \times 10^{-8}}{0.20} \right) = -18,000 \text{ V}$

على التقيض من القوى او المجالات فإن الشغل والجهد كميات قياسية وليست موجهة لذا فكونها مجرد أرقام بدون اتجاه فإنه يمكن جمع هذه الكميات حسب اشارتها السالبة أو الموجبة . وعلى هذا تكون النتيجة للجهد المطلق عند B هي ولذا $V_B = V_1 + V_2 + V_3$

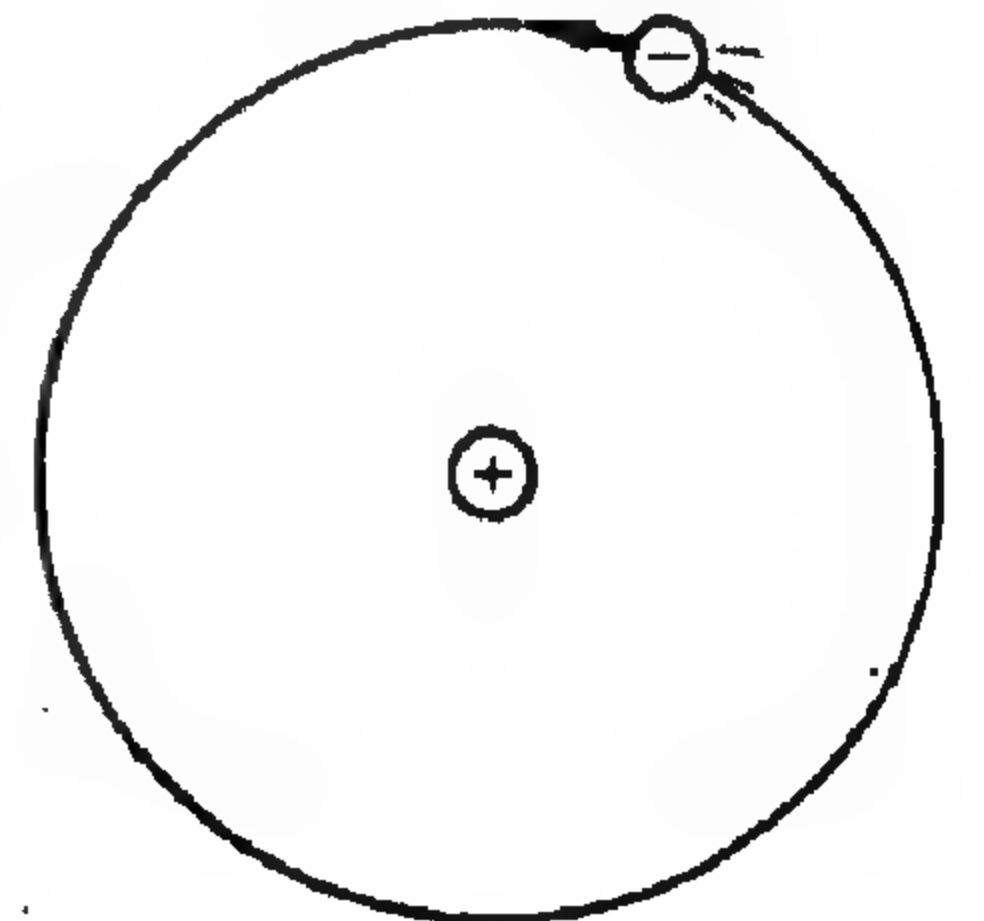
$$V_B = -6300 \text{ V}$$

حيث أن هذه النتيجة سالبة ، فاننا نستنتج أن وحدة الشحنات الموجبة لها فعلا وضع عند B أقل مما لها في المالا نهاية وهذا يجب أن يعنى أن تأثير تجاذب الشحنة السالبة معها كان أقوى من تنافرها مع الشحنتين الموجبتين .

مثال توضيحي ١٦ - ١١ : تتكون ذرة الأيدروجين من الكترون يدور في مدار حول البروتون كما هو موضح تخطيطيا في شكل ١٦ - ٢٧ . يقع الالكترن على بعد نصف قطر مقدار $r = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$ من مركز البروتون . اوجد الشغل المبذول في جذب الالكترن من مداره ودفعه الى مالا نهاية أى اللازم لفصل الالكترن عن الذرة ليصبح طليقا .

طريقة الحل : دعنا نعتبر أولا بروتونا منفصلا . الموقف هنا يشبه ما سبقت مناقشته فيما يتعلق بالشكل ١٦ - ٢٥ . ونذكر أن الجهد المطلق عند النقطة B يعطى بالمعادلة (١٦ - ٦) حيث $V = kQ/r$ وهذه الكمية حسب التعريف ، هي فرق الجهد بين المالا نهاية والنقطة B .

شكل ١٦ - ٢٧
يصور الإلكترون في ذرة الأيدروجين دائما على أنه يدور في مدار حول البروتون



في الحالة الراهنة ستكون النقطة B واقعة على مدار الإلكترون بحيث يكون $r = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$ وتكون الشحنة Q على البروتون هي 1.6×10^{-19} بالتعويض بهاتين الكميتين نجد :

$$V = k \frac{Q}{r} = 27.2 \text{ V}$$

هذه الكمية هي فرق الجهد بين موقع الإلكترون ومالائهية .

لو كان علينا أن نجذب الإلكترون الى مالا نهية للزم أن نحمله خلال هذا الفرق في الجهد . ولكن المعادلة (١٦ - ٥) تفيد بأن الشغل المبذول في مثل هذه الحالة يكون :

$$\text{الشغل} = q \times \text{فرق الجهد}$$

حيث q هي شحنة الإلكترون

وفي هذه الحالة يصبح الشغل :

$$\text{الشغل} = (27.2 \text{ V})(1.60 \times 10^{-19} \text{ C}) = 4.3 \times 10^{-18} \text{ J}$$

حيث استخدمت حقيقة أن شحنة الإلكترون هي $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

كما نرى فإن الكمية $4.3 \times 10^{-18} \text{ J}$ من الشغل يجب أن تبذل لفصل الإلكترون عن ذرة الأيدروجين أى لتأين الذرة . ولكن الإلكترون له أصلاً طاقة حركة KE أثناء دورانه في المدار وهو بهذا يساعد في بذل الشغل . ولكن طاقة حركة الإلكترون تبلغ نصف كمية الشغل الكلى الواجب بذله . وبناء عليه فإن العامل الخارجى يمكنه جعل ذرة الأيدروجين تتأين ببذل نصف كمية الشغل المحسوبة سابقاً . $4.3 \times 10^{-18} \text{ J}$

ملخص :

هناك نوعان من الشحنة مميزان بالعلامتين $+$ و $-$ يحمل الإلكترون شحنة مقدارها $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ بينما يحمل البروتون شحنة مقدارها $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. تتنافر الشحنات المتشابهة مع بعضها البعض والشحنات المختلفة تتجاذب .

تعطى القوة المؤثرة على شحنة q_1 على مسافة r من شحنة نقطية أخرى q_2 بقانون كولوم :

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

حيث تقاس q_1 و q_2 بالكولوم أما $k \approx 9 \times 10^9$ بوحدة SI .

شدة المجال الكهربائى E في نقطة ما هي القوة المؤثرة على وحدة شحنة اختبار موجبة عند تلك النقطة . وتكون وحداتها هي نيوتن لكل كولوم أو فولت لكل متر . تمثل المجالات الكهربائية بخطوط المجال التى هي مماسات للكمية E . تتبع هذه الخطوط من الشحنات الموجبة وتنتهى عند الشحنات السالبة . يكون المجال أشد ما يمكن حيث تكون الخطوط أكثر تقارباً .

تحت الظروف الالكتروستاتية يكون المجال في داخل جسم معدني صفرا . وتنتهي خطوط المجال عند سطح المعدن وتكون عمودية على السطح . تستقر الشحنات الفائضة في جسم معدني على سطح هذا الجسم .

المجال الكهربائي الساكن هو مجال احتفاظي ، وحسب ، التعريف يكون فرق الجهد من A الى النقطة B هو الشغل المبذول في حمل وحدة شحنة اختبار موجبة من A الى B وتكون وحداته هي جول لكل كولوم أو فولت $\text{Joules per coulombs or volts}$ وتمثل بالمقدار $(V_B - V_A)$. اذا كان الخط الواصل بين B و A على طول اتجاه مجال ثابت E فإن متجه فرق الجهد يكون Ed حيث d هي المسافة من A الى B .

خطوط واسطح وحجوم تساوي الجهد تتكون من نقط تقع جميعها عند نفس الجهد . تتقاطع خطوط المجال مع خطوط واسطح تساوي الجهد بحيث تكون دائما متعامدة معها ..

الجهد المطلق عند نقطة ما هو فرق الجهد بين هذه النقطة الملائمة . وحسب هذه الاصطلاحات فإن النقط الواقعة في الملائمة يكون جهدها الكهربي صفرا . والجهد المطلق على مسافة r من مركز شحنة نقطية q هو kq/r

الحل الأول من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

- ١ - أن تذكر ما هما نوعا الشحنة وأيهما يوجد على البروتون وأيهما على الالكترون وأن تصف القوة التي تؤثر بها شحنة على الأخرى .
- ٢ - أن تميز بين العوازل والموصلات وأشياء الموصلات .
- ٣ - أن تشرح كيف يمكن شحن جسم بالتوصيل وبالحث وأن تصف ، كيفيا ، طريقة توزيع الشحنات على جسم معدني حين يقترب منه جسم مشحون .
- ٤ - أن تذكر النتائج التي يمكن استخلاصها من تجربة دلو الثلج لفاراداي .
- ٥ - أن تستخدم قانون كولوم في إيجاد القوة المؤثر على شحنة معينة موجودة بجوار شحنات نقطية أخرى .
- ٦ - أن تشرح ماهي المعلومات التي يمكن جمعها من رسم مجال كهربائي . ومن هذا تعرف E . وتشرح كيف ترسم خطوط المجال وتذكر كيف تتصرف هذه الخطوط بالقرب من شحنات نقطية وكذا بجوار وداخل المعادن .
- ٧ - أن تستعمل العلاقة $F = qE$ في مواقف بسيطة .
- ٨ - أن تخطط وترسم خطوط المجال الكهربائي بجوار اجسام بسيطة مشحونة
- ٩ - أن تعرف ماهو المقصود بشحنة الاختبار وتستخدمها لتعريف فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين .
- ١٠ - أن تحسب فرق الجهد بين نقطتين محددتين في مجال كهربائي ثابت . وأن توضح أسطح وخطوط متساوي الجهد في حالة بعض المواقف البسيطة التي تتضمن أجساما مشحونة محددة .
- ١١ - أن تستخدم العلاقة $W = (V_B - V_A)q$ في مواقف محددة بسيطة .
- ١٢ - أن تشرح بالكلمات ماهو المقصود بالجهد المطلق عند نقطة ما . وأن تعطى قيمته عند مسافة محددة من شحنة نقطية . أن توجد الجهد المطلق عند نقطة ما نتيجة لوجود العديد من الشحنات النقطية بالقرب من تلك النقطة .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

العوازل مقابل الموصلات ، أشباه الموصلات

المكشاف الكهربائي (الالكتروسكوب)

الأرضية الكهربائية

الشحنة المتكونة بالحث
تجربة دلو الثلج لغازداى

قانون كولوم

الشحنات الفائضة تشكل كسرا صغيرا من الشحنة الكلية .

المجال الكهربائى والكمية E

فرق الجهد الكهربائى

المجال الكهربائى الساكن مجال احتفاظى

متساويات الجهد

الجهد المطلق عند نقطة ما

أسئلة وتخمينات

١ - يمكن اكساب مشط أو مسطرة من البلاستيك شحنة ساكنة معينة عن طريق ذلك بشدة بقطعة من القماش الجاف . كيف يمكنك تحديد اشارة الشحنة المتكونة على المشط أو المسطرة ؟

٢ - اذا شحن مشط أو قلم رصاص من البلاستيك بالطريقة المشار اليها فى ١ - فإنه يقوم بجذب قصاصات صغيرة من الورق . اشرح السبب (تلميح : اذا كان الورق على درجة ضئيلة من الرطوبة فإنه يوصل الكهرباء بشكل ضئيل) عند مسح أسطوانة الحاكي بقطعة من القماش الجاف فإنها عادة تجذب الغبار والنسالات لماذا ؟

٣ - أحيانا يصبح جسدك كله مشحونا حين تمشى على سجادة عميقة النسيج أو إذا انزلت فى مقعد السيارة البلاستيك . لو أنك عندها مددت اصبعك نحو المقبض المعدنى لباب السيارة فإن شرارة تفقر منه . اشرح .

٤ - كيف يمكنك شحن جسم معدنى بشحنة موجبة باستخدام مشط من البلاستيك ذى شحنة موجبة أو باستخدام قلم من البلاستيك مشحونة بشحنة سالبة ؟

٥ - النقطتان A و B موجودتان عند نفس الجهد . هل معنى هذا بالضرورة انه لا يبدل أى شغل فى نقل شحنة اختبار موجبة من نقطة لأخرى ؟ وهل معنى هذا أنه لا تلزم قوة لنقل شحنة الاختبار من نقطة لأخرى ؟ اشرح

٦ - هل يمكن أن يتقاطع سطحان من أسطح متساوى الجهد ؟ اشرح .

٧ - اثبت أن جميع النقط فى قطعة من المعدن تقع عند نفس الجهد لو انه لم يكن هناك تيار يمر فى المعدن .

٨ - يكون الجهد المطلق فى نقطة تقع فى منتصف المسافة بين شحنتين نقطيتين متساويتين ومتضادتين مساويا صفرا . هل يمكنك إيجاد طريق واضح بحيث لا يبدل على طوله أى شغل أثناء حمل شحنة اختبار موجبة من مالا نهاية الى هذه النقطة ؟ أشرح .

٩ - بادئا من الحقيقة القائلة بأن قطعة المعدن التى ليس بها تيار يسرى هى بالفعل جسم متساوى الجهد ، اثبت أن المجال الكهربائى داخل قطعة مجوفة من المعدن صفر .

١٠ - ارسم المجال الكهربائى بين سحابة مشحونة بشدة وعمود للبرق مثبت فوق مبنى لماذا يجب أن يتصل العمود بأمان كبير بالأرض .

١١ - علق مكعب من المعدن بخيط معزول . فلو كان المكعب مشحونا بشحنة موجبة فماهى - بالتقريب - كيفية توزيع الشحنات عليه ؟

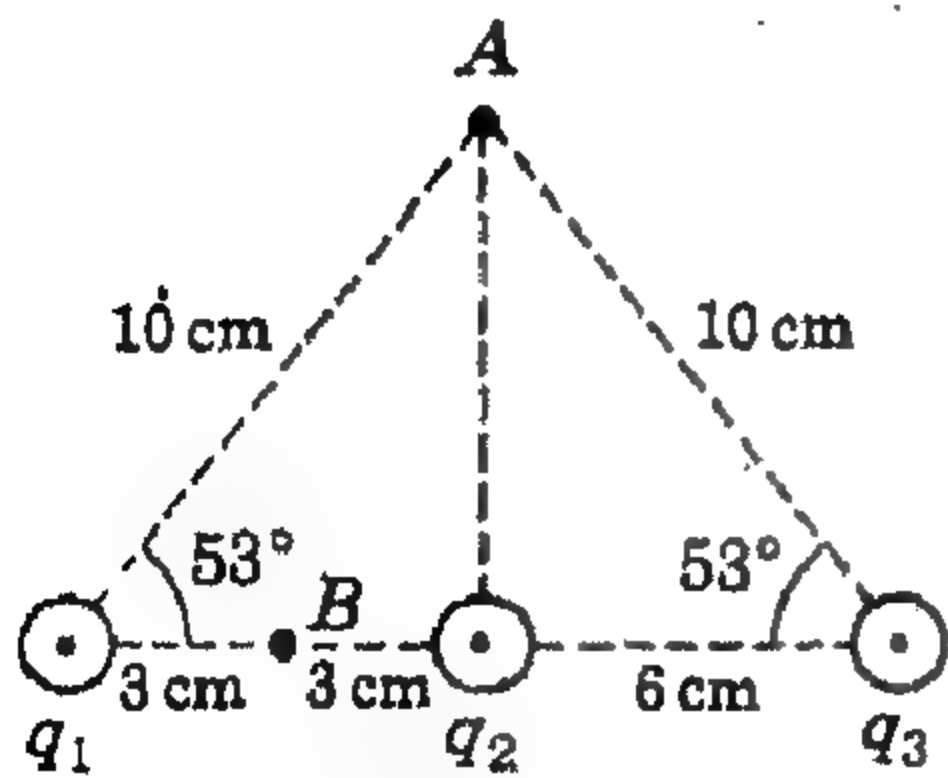
١٢ - اذا كانت $V = 0$ فى نقطة ما فهل من الضرورى أن تكون E صفرا كذلك ؟

١٣ - ماذا يمكن أن يقال عن E فى منطقة يكون فيها V ثابتا ؟

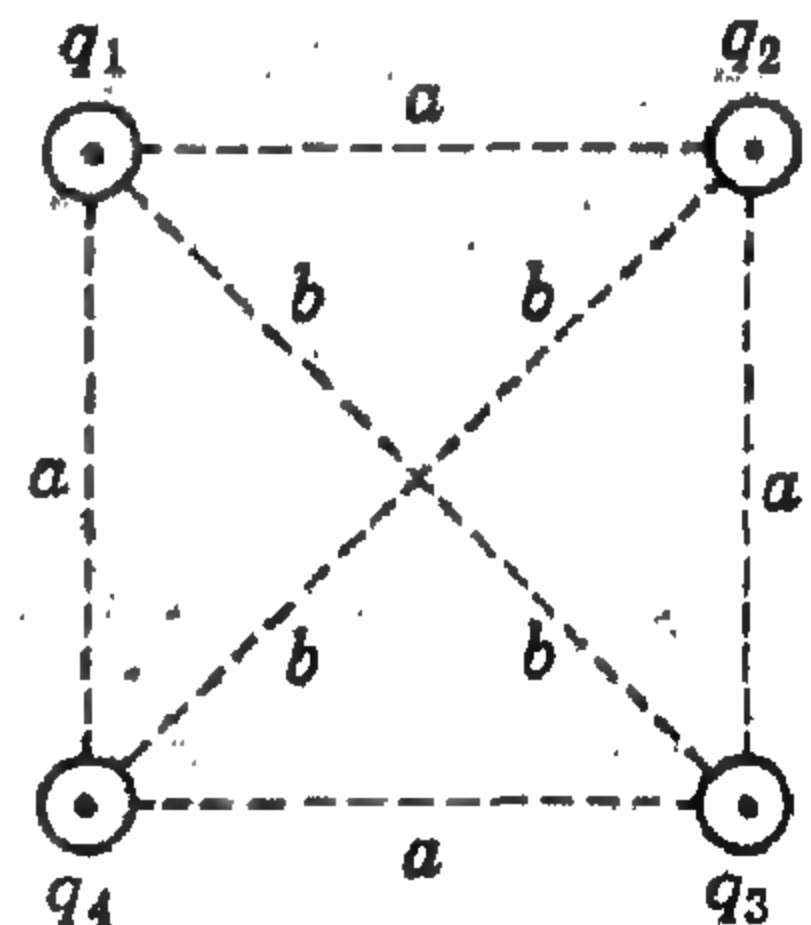
١٤ - برهن على أن جميع النقط فى جسم معدنى تقع عند نفس الجهد تحت ظروف الكهروستاتية

مسائل

- ١ - شحنتان نقطيتان $+6 \times 10^{-5} \text{ C}$ و $+2 \times 10^{-5} \text{ C}$ بينهما مسافة مقدارها 0.30 m أوجد القوة المؤثرة على أى منهما .
- ٢ - شحنة نقطية $8 \times 10^{-6} \text{ C}$ موضوعة على محور x عند $x = 0$ بينما وضعت شحنة نقطية مجهولة على نفس المحور عند $x = 50 \text{ cm}$. فإذا كانت القوة المؤثرة على الشحنة المجهولة هي 300 N ، أوجد إشارة ومقدار الشحنة المجهولة .
- ٣ - فى نموذج بوهر لذرة الأيدروجين يقوم الإلكترون بالدوران حول النواة (بروتون) نصف القطر قدره $0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$ (أ) ماهى القوة التى يؤثر بها البروتون على الإلكترون ؟ (ب) تقوم هذه القوة بتوفير قوى الجذب المركزى التى تمسك بالإلكترون فى الجدار . ماهى سرعة الإلكترون فى المدار ؟ (الشحنتان على كل جسيم هي e) كتلة الإلكترون $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- ٤ - وضعت الشحنتان الثلاث الآتية على محور x : $+4 \mu\text{C}$ عند $x = 0$ ، $+2 \mu\text{C}$ عند $x = 30 \text{ cm}$ ، $+6 \mu\text{C}$ عند $x = 60 \text{ cm}$ أوجد : (أ) القوة المؤثرة على الشحنة $-6 \mu\text{C}$ (ب) القوة المؤثرة على الشحنة $-6 \mu\text{C}$
- ٥ - وضعت أربع شحنتات نقطية كما يوضح الشكل (م ١٦ - ١) عند الأركان الأربعة لمربع اذا كانت $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 5 \mu\text{C}$ و $a = 30 \text{ cm}$ أوجد مقدار واتجاه القوة المؤثرة على q_3 .
- ٦ - فى منطقة معينة من الفضاء كانت كرة دقيقة من النخاع ذات شحنة $-3.0 \times 10^{-12} \text{ C}$ تتعرض لقوة مقدارها $5.0 \times 10^{-7} \text{ N}$ فى اتجاه $+x$. ماهو مقدار واتجاه المجال الكهربى فى تلك المنطقة ؟
- ٧ - وضعت شحنتان على محور x : $+6 \mu\text{C}$ عند $x = 60 \text{ cm}$ ، $-3 \mu\text{C}$ عند $x = 0$ أوجد المجال الكهربى عند (أ) $x = 30 \text{ cm}$ (ب) $x = 100 \text{ cm}$
- ٨ - أوجد شدة المجال الكهربائى عند مركز المربع الموضح فى الشكل (م ١٦ - ١) اذا كان :
(أ) $q_1 = q_2 = q_3 = q_4$ (ب) $q_1 = q_2 = 2 \mu\text{C}$ و $q_3 = q_4 = -4 \mu\text{C}$ ، $b = 50 \text{ cm}$
- ٩ - اذا كانت $q_1 = q_3 = -6 \mu\text{C}$ و $q_2 = 2 \mu\text{C}$ فى الشكل (م ١٦ - ٢) ، فما شدة المجال الكهربى عند النقطة A ؟
- ١٠ - ** (أ) فى الشكل (م ١٦ - ٢) اذا كانت $q_1 = q_2 = 6.4 \mu\text{C}$ فما هى قيمة q_3 اللازمة لجعل المجال الكهربى عند A متجهها على طول الخط الموازى لخط الشحنتات الثلاث ؟ (ب) ماهى قيمة المجال فى هذه الحالة ؟
- ١١ - اذا كان فرق الجهد من A الى B هو 60 V فما هو الشغل اللازم لحمل (أ) بروتون ($q = e$) من A الى B (ب) الكترون ($q = -e$) من A الى B .
- ١٢ - لوحان معدنيان متوازيان تفصلهما مسافة قدرها 0.20 cm ومما متصلان ببطارية (6 V) . أوجد المجال بين اللوحين .



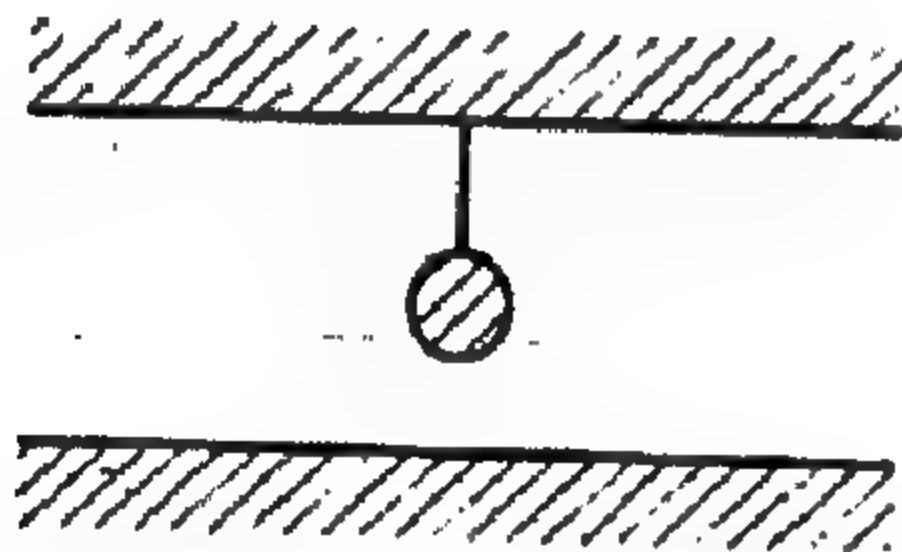
شكل (م ١٦ - ٢)



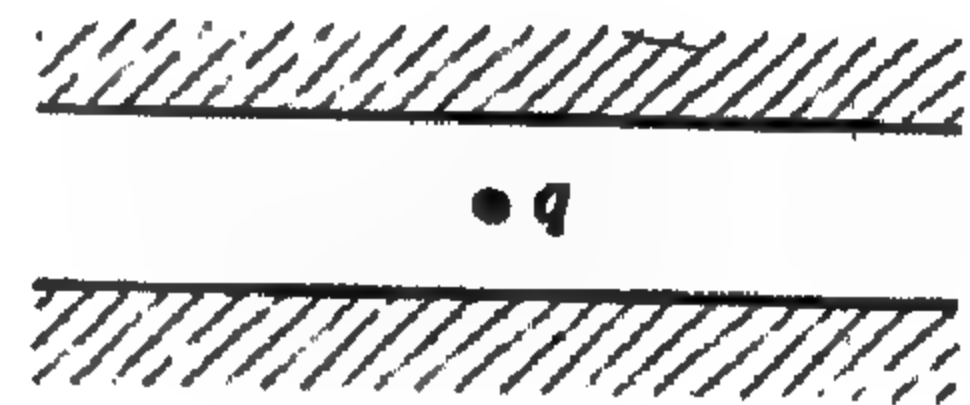
شكل (م ١٦ - ١)

- ١٣ - وصل لوحان معدنيان متوازيان ببطارية 6 V ، فإذا كان المجال بين اللوحين هو 300 V/m (أ) ماهى المسافة بين اللوحين ؟ (ب) ماهى القوة المؤثرة على الكترون بين اللوحين ؟ شحنة الإلكترون هي $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

- ١٤ - شحنتان هما $+6 \mu C$ و $-3 \mu C$ تفصلهما مسافة 60 cm اوجد الجهد المطلق عند نقطة تقع في منتصف المسافة بينهما .
ماهو الشغل اللازم لحمل شحنة مقدارها $3 \mu C$ من مالا نهاية الى تلك النقطة ؟
- ١٥ - ماهو الجهد المطلق عند مركز المربع في الشكل (م ١٦ - ١) (أ) اذا كانت $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 2 \mu C$ و (ب) اذا كانت $b = 30 \text{ cm}$ ، $q_4 = -6 \mu C$ ، $q_1 = q_2 = q_3 = 2 \mu C$
- ١٦ - في الشكل (م ١٦ - ٢) اذا كانت $q_1 = 2 \mu C$ و $q_2 = -8 \mu C$ ، $q_3 = +4 \mu C$ فما هو الجهد المطلق عند النقطة A ؟
- ١٧ - في الشكل (م ١٦ - ٢) (أ) ماهو فرق الجهد بين النقطتين A ، B اذا كانت $q_1 = +3 \mu C$ ، $q_2 = -6 \mu C$ ، $q_3 = -9 \mu C$ (ب) ماهي قيم V_A ، V_B ؟
- ١٨ - * في الشكل (م ١٦ - ٣) هناك جسيم بين لوحين متوازيين ومشحونين بشحنات مختلفة . اعتبر الجسيم الكترونا $(m = 9.10^{-31} \text{ Kg}, q = -e)$ (أ) كم يجب أن يكون المجال الكهربائي بين اللوحين حتى يظل الجسيم ساكنا بلا حركة تحت التأثير المزدوج لقوى الجاذبية والمجال الكهربائي ؟ (ب) هل يجب أن يكون اللوح الأعلى موجبا أم سالبا ؟ (ج) اذا كانت المسافة بين اللوحين هي 2.00 mm فما هو فرق الجهد اللازم بين اللوحين ؟
- ١٩ - اذا كان الجسيم الموجود بين اللوحين في الشكل (م ١٦ - ٣) ذو كتلة مقدارها $4 \times 10^{-12} \text{ g}$ وكان من الممكن جعله ساكنا ضد الجاذبية بوضع فرق للجهد مقداره 245V بين اللوحين بحيث يكون اللوح الأعلى سالبا والمسافة بين اللوحين 2.0 mm فاوجد : (أ) شدة المجال الكهربائي بين اللوحين و (ب) اشارة ومقدار الشحنة التي على الجسيم .
- ٢٠ - * المسافة التي تفصل بين اللوحين المعدنيين المتوازيين في الشكل (م ١٦ - ٤) هي 10 cm أما فرق الجهد بينهما فهو 28 V علقت كره صغيره من النخاع كتلتها 0.6 m من اللوح الأعلى ماهو الشد في الخيط اذا كانت الكرة تحمل شحنة مقدارها $20 \mu C$ ؟ هناك اجابتان ممكنتان ماهما ؟
- ٢١ - ** وضعت شحنة نقطية مقدارها $2 \mu C$ على خط مستقيم محدد بالشحنتين $27 \mu C$ و $3 \mu C$ اللتين تفصلهما مسافة 100 cm . (أ) أين يجب وضع الشحنة $2 \mu C$ حتى تصبح محصلة القوة المؤثرة عليها صفرا . (ب) هل الشحنة في وضع اتزان مستقر أم غير مستقر ؟



شكل م ١٦ - ٤



شكل م ١٦ - ٣

الفصل السابع عشر

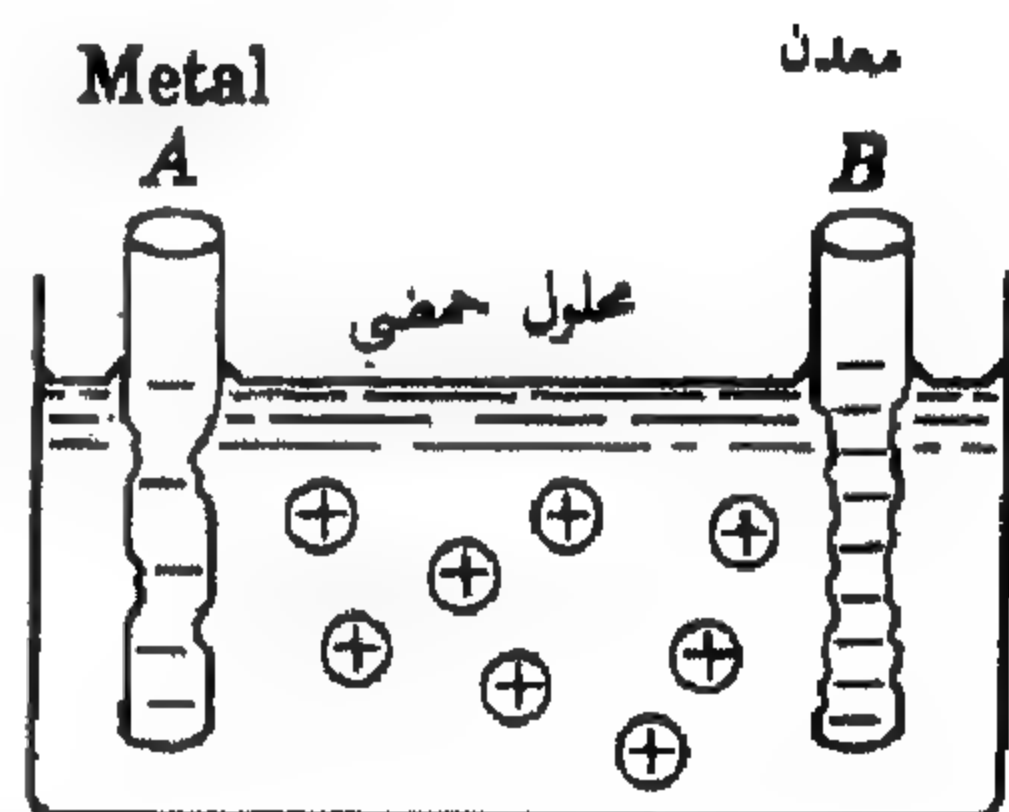
عناصر الدائرة وسلوكها

سندرس في هذا الفصل كيف يؤدي فرق الجهد الى ظهور تيار كهربائي في الأسلاك وستتعرف على ثلاثة عناصر رئيسية هي : البطارية ، المقاوم والمكثف وستتم مناقشة المعادلات الرياضية التي تحكم الدوائر التي تحتوي على هذه العناصر وذلك كمقدمة لدراسة دوائر التيار المستمر التي ستبحث في الفصل التالي .

١٧ - ١ البطاريات كمصدر لفرق الجهد

ان الفرض الأساسي لوجود البطارية في أغلب الدوائر الكهربائية هو امداد هذه الدائرة بالطاقة اللازمة لتشغيلها . وعلى الرغم من أن معظم البطاريات ذات طابع كيميائي ، إلا أن هناك أنماطا أخرى أخذت في الظهور والإنتشار . والبطارية العادية ذات الخلية الرصاصية وهي ذاتها البطارية المستخدمة في السيارات تستمد الطاقة من تفاعل كيميائي ، وينطبق نفس الشيء على البطارية الجافة التي - على الرغم من التسمية - ليست بجافة في داخلها ، وربما يكون القارىء قد سمع عن البطارية « الشمسية » التي تستخدم كمصدر للطاقة الكهربائية للأجهزة المستخدمة في الفضاء . إن هذا النوع الأخير من البطاريات يعمل على اساس مختلفة تماما ويقوم بتحويل الضوء والحرارة مباشرة الى طاقة كهربائية . كما أن هناك انواعا أخرى من البطاريات غير الكيميائية لازالت تحت التطوير .

وفيما يلي سنعتبر البطارية كمصدر للطاقة وفرق الجهد دون النظر الى ما تحتويه بداخلها - إن الخاصية الرئيسية لكل البطاريات المعروفة هي وجود نهايتين (أو عمودين معدنيين موجودين فوق علبه البطارية) بينهما فرق للجهد . والرمز المستخدم عادة للتعبير عن البطارية $\text{---} \text{+}$ حيث يشير الخط الأطول والمميز بالعلامة (+) الى الطرف الموجب للبطارية أما الطرف الأقصر والمميز بالعلامة (-) فيشير الى الطرف السالب . وعادة ما ترفع العلامتان (+) ، (-) حيث يتوقع أن يكون القارىء قد استوعب أن الطرف الأطول هو الموجب والأقصر هو السالب (يلاحظ دائما وجود خاتم بعلامة + ، - ، على طرفي البطارية وفي بعض الأحيان يكتفى بدهان الطرف الموجب باللون الأحمر) .



إن البطارية الكيميائية البسيطة يمكن عملها عن طريق غمس قضيتين معدنيين مختلفين في محلول حمضي مخفف كما هو موضح في شكل ١٧ - ١ .

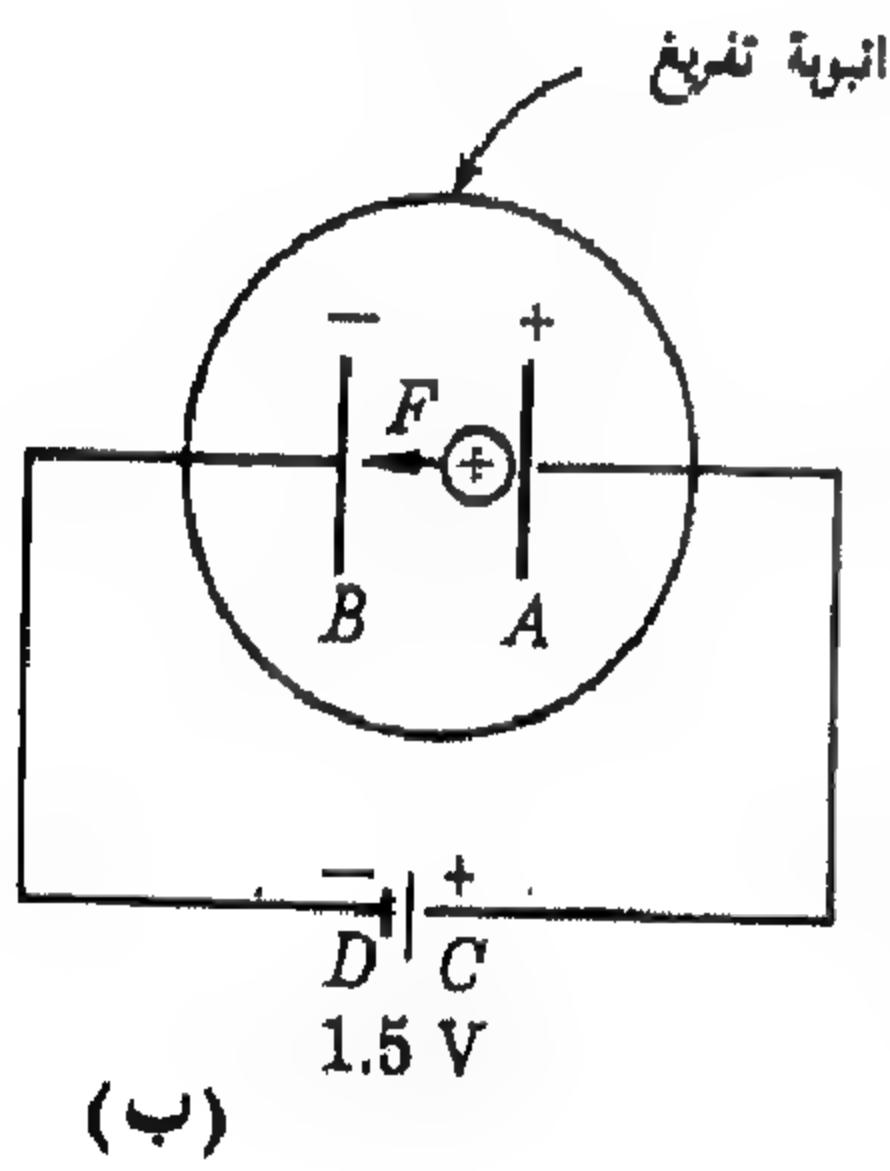
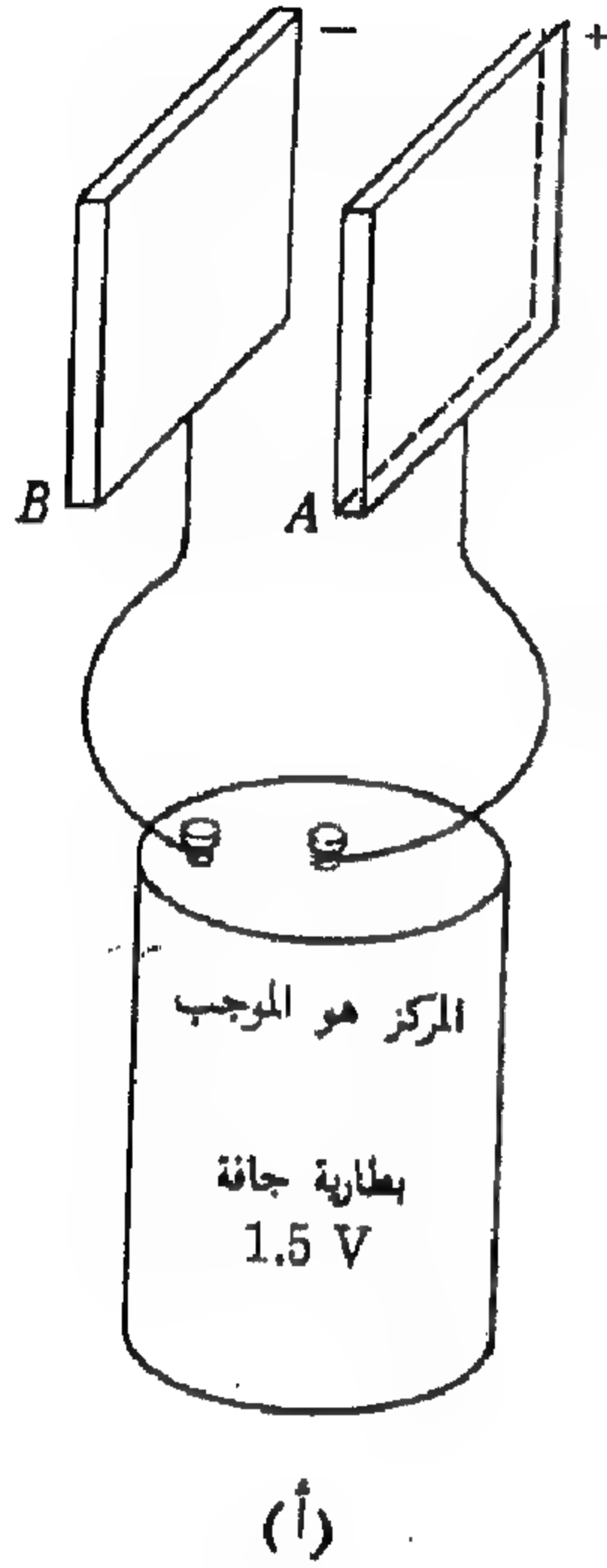
شكل ١٧ - ١

ومعظم المعادن تذوب في الأحماض بدرجات متفاوتة . وعند الذوبان فإن ذرات المعادن تترك وراءها الكاتيونات واحدا على الأقل ملتصقا بالقضيب المعدني وتدخل هذه الذرات الى المحلول على هيئة أيونات موجبة . أما القضيب المعدني أو القطب الذي خرج منه الايون فإنه يشحن بشحنة سالبة خلال هذه العملية وفي النهاية يصبح القطب سالبا لدرجة أن عددا مائلا من الايونات الموجبة ينجذب اليه مرة أخرى بحيث يصبح العدد الصافي للأيونات التي تغادر القطب مساويا للصفر . وحيث ان القطب يحتوى على المزيد من الشحنات السالبة لذا يتكون فرق للجهد بينه وبين المحلول .

تدخل الأيونات الموجبة الى محلول مخلفه الالكترونات فوق الأقطاب وفي الحالة الموضحة فإن المعدن B قد فقد ايونات أكثر من المعدن A (وذلك في وحدة الحجم) أي القطبين عند جهد أعلى ؟

في شكل ١٧ - ١ يكون فرق الجهد بين القطب والمحلول اكبر للمعدن B عنه للمعدن A وذلك لأن B يذوب بدرجة اكبر من A . وحيث أن كلا القطبين سائين ، فإنهما عند جهد اقل من جهد المحلول . على أن المعدن B عند جهد أقل من A ولذا فعند الذهاب من القطب A إلى القطب B فإننا ننتقل من جهد أعلى إلى جهد أقل ، ويسمى فرق الجهد هذا القوة الدافعة الكهربائية (وهي تسميه خاطئه) أو $Q . د . ك$. للبطارية . وعلى هذا فإن القضيب A سيكون هو الطرف الموجب للبطارية أما القضيب B فسيكون الطرف السالب والقوة الدافعة الكهربائية ($Q . د . ك$) لبطارية ستمثل بالرمز \mathcal{E} . ويجب عدم الخلط بينهما وبين الرمز E المستخدم للدلالة على شدة المجال الكهربائي . وعليه فإن القوة الدافعة \mathcal{E} تكون هي فرق الجهد بين طرفي البطارية حينما تكون هذه البطارية معزولة كهربائيا

١٧ - ٢ حركة الشحنة في مجال كهربائي



ذكرنا في القسم السابق أن الغرض الرئيسي للبطارية هو امداد الطاقة ولنحاول الآن دراسة بعض الأمثلة التي توضح كيف تقوم البطارية بمد الشحنات بالطاقة . اعتبر أولا الموقف الموضح في شكل ١٧ - ٢ أحيث تتصل البطارية بلوحيْن معدنيين ، والموقف ذاته موضح باختزال في الشكل ١٧ - ٢ ب وكما هو واضح فأننا سنعتبر ان اللوحيْن موجودان في فراغ .

تقوم البطارية بوضع شحنات زائده على كل من اللوحيْن . وكما هو موضح فان اللوح A يكون موجبا نظرا لا اتصاله بالطرف الموجب للبطارية . وتستغرق عملية نقل الشحنة هذه كسرا ضئيلا من الثانية يصير الموقف بعدها كهروستاتي وكما نذكر فإنه تحت الظروف الكهروستاتية تكون المعادن الصلبة عبارة عن حجوم تساوى الجهد ، وعليه فإن السلك الواصل من C إلى A واللوح A نفسه كلها عند نفس الجهد أو قل إنها عند نفس المستوى الكهربائي ، وبالمثل فان النقط D ، B وكذا اللوح B تقع جميعها عند نفس المستوى . ولكن ، النقطة D أقل من النقطة C بما قيمته $1.5V$ وعليه فان اللوح B منخفض في الجهد عن A بمقدار $1.5V$ ، أي ان فرق الجهد بين B إلى A مقداره $1.5V$ والنقطة A عند المستوى الأعلى .

افترض الآن أن شحنة موجبة قد حررت من اللوح A كما هو موضح في الشكل ١٧ - ٢ ب ومن الطبيعي ان تتنافر هذه الشحنة مع اللوح A وتنجذب ناحية اللوح B أي أنها تتسارع من A إلى B . وكما نرى فإن الشحنة الموجبة « تنحدر » من اللوح A ذي الجهد العالي إلى اللوح B ذي الجهد المنخفض .

تنحدر الشحنات الموجبة من الجهود العالية نحو الجهود المنخفضة

والآن لنر كم من الطاقة يكتسب حين تسقط الشحنة من A إلى B .

شكل ١٧ - ٢
فرق الجهد من B إلى A هو
 $1.5V$ هو عبارة عن Q
 $د . ك$ للبطارية :

نذكر من الباب السابق أن الشغل المطلوب لحمل شحنة موجبة الى « أعلى التل » خلال فرق الجهد V يمكن حسابه كما يلي . حين يكون اللوح A عند جهد اعلى من جهد B بمقدار V حيث $V = 1.5 \text{ V}$ ، فإن حمل شحنة q من B الى A يتطلب شغلا مقداره qV (وهذا ينتج من أن V هو الشغل المطلوب لحمل وحدة الشحنات الموجبة من B الى A) .

ولكن حين تتحرر شحنة q عند اللوح A وتنحدر نحو B فإنها بالتالى تسترد كمية من الطاقة مساوية لهذا الشغل ، وعلى هذا نرى أن :

حين تنحدر شحنة q خلال فرق للجهد V ، فإنها تكتسب طاقة قيمتها qV .

ولنحاول الآن الإفادة من هذه الحقائق في دراسة الأمثلة التالية :

مثال توضيحي ١٧ - ١ : اذا كانت الشحنة الموجبة في شكل ١٧ - ٢ بروتونا ($m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, $q = +e$) وحررت هذه الشحنة عند اللوح 4 فما هى سرعتها قبل أن تصطدم باللوح B ؟

طريقة الحل تنحدر الشحنة خلال فرق للجهد $V = 1.5 \text{ V}$ ولذا تكتسب طاقة مقدارها qV حيث $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. وتظهر هذه الطاقة كزيادة في طاقة حركة البروتون . ولما كانت السرعة الابتدائية للبروتون صفرا ، فإن ،

$$\frac{1}{2}mv_f^2 = \frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \text{KE}$$

وحيث أن هذه الزيادة تساوى qV ، لذا

$$qV = \frac{1}{2}mv_f^2$$

ومنها نجد أن :

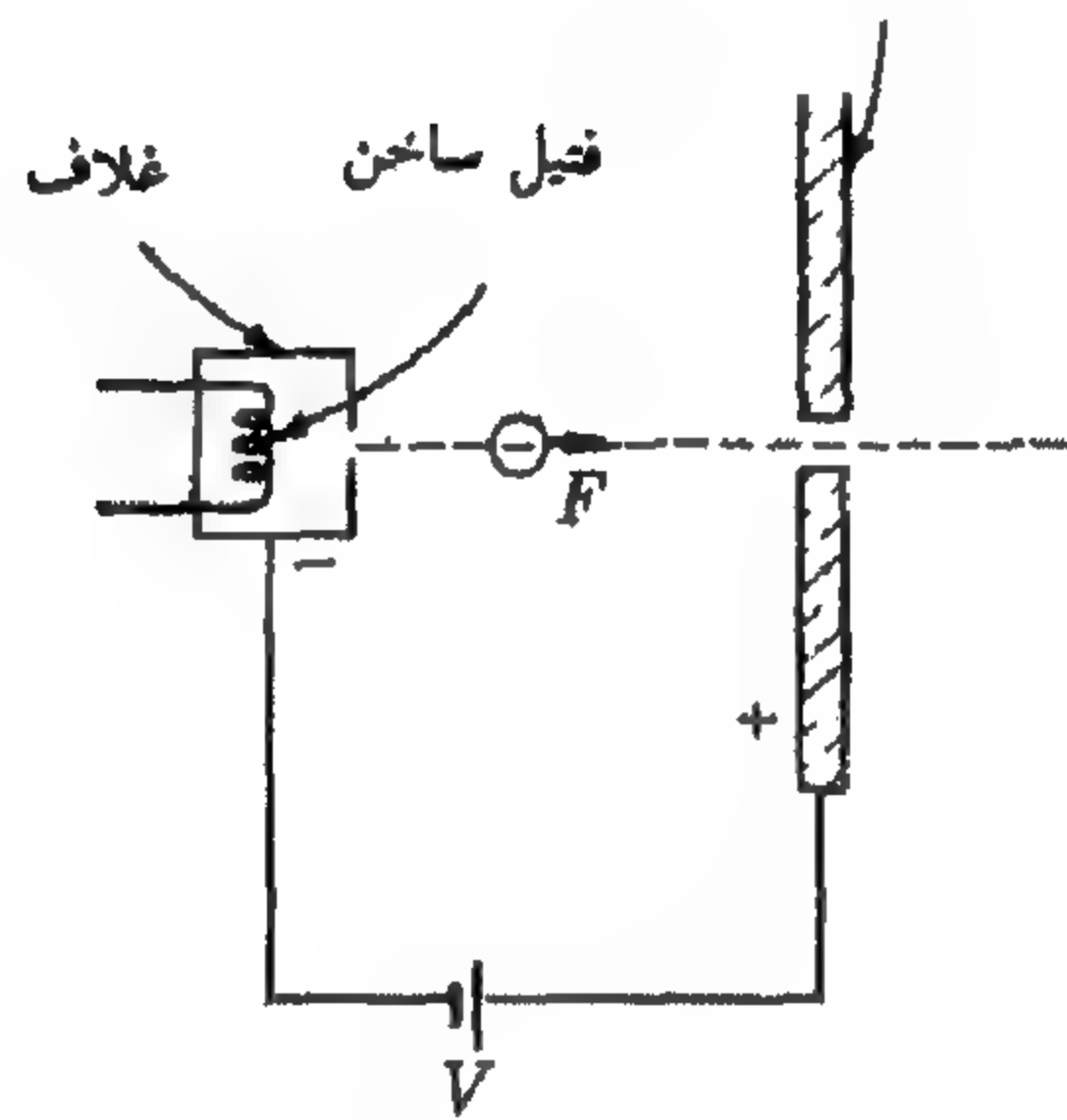
$$(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1.5 \text{ V}) = \frac{1}{2}(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})v_f^2$$

والحل يعطينا $v_f = 1.7 \times 10^4 \text{ m/s}$ وهنا نلاحظ مدى السرعة الهائلة التى يتحرك بها البروتون وهوينحدر فى هذا الفرق الضئيل فى الجهد .

مثال توضيحي ١٧ - ٢ يعطى كثير من الآلات الإلكترونية صورا مرئية للإشارات الكهربائية ومثال ذلك الصور التى تظهر على شاشة التليفزيون . وللحصول على مثل هذه الصور يقوم مدفع الكترونى بقذف شعاع من الإلكترونات نحو مادة فلورية عند نهاية الأنبوب وحين يقوم الشعاع بالمسح المتكرر عبر وجه الأنبوب فإنه بهذا يرسم

الصورة التي نراها . ويوضح شكل ١٧ - ٣ مدفعا الكترونيا مبسطا جدا . تتطابق الإلكترونات - اثناء غليانها - من فتيلة مسخنه لدرجة الإبيضاض وهي داخل غلاف معدني ، ويتجول العديد من هذه الإلكترونات خارج الغلاف المعدني لينفذ من فتحة دقيقة كما هو موضح . وعند ذلك « ترى » الإلكترونات ان الغلاف سالب الشحنة وأن اللوح الذي الى اليمين موجبا فتسارع اليه . فإذا ما وصلت الإلكترونات الى اللوح تكون سرعتها قد أصبحت كبيرة للغاية فتندفع بعض الإلكترونات خلال الفتحة الدقيقة التي في منتصف اللوح . نتيجة لهذا يصبح لدينا شعاع دقيق من الإلكترونات (من الناحية العملية ، يكون تركيب المدفع الالكتروني اكثر تعقيدا عما هو موضح بالرسم) .

لوحة التسجيل (التسارع)



شكل (١٧ - ٣)
يقوم المدفع الإلكتروني
بقذف شعاع من
الإلكترونات نحو اليمين . في
أنبوب التليفزيون النقطية يكون
المدفع الإلكتروني أكثر
تعقيدا عن الموضح
بالشكل . يقوم الشعاع
الإلكتروني بالانتقال في
الفراغ ويصطدم في النهاية
بالستار الفلوري التي توضع
في أقصى اليمين .

يلعب فرق الجهد الذي تتسارع خلاله الشحنات في أنبوبة جهاز تليفزيون حوالى $20,000 \text{ V}$ اوجد سرعة الإلكترونات التي تخرج من المدفع الالكتروني .
طريقة الحل : نلاحظ في هذه الحالة أن الشحنات تنحدر من - الى + حيث يسلك الإلكترون - وهو سالب الشحنة سلوكا معاكسا للشحنات الموجبه . على أنه في كلتا الحالتين يكون التغير في طاقة الحركة KE للجسيم ذى مقدار هو $|qV|$ ولذا فبوضع $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ و $V = 2 \times 10^4 \text{ V}$ فإن :

$$\text{التغير طاقة الحركة} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(2 \times 10^4 \text{ V}) = 3.2 \times 10^{-15} \text{ J}$$

ولكن الإلكترون كان ذا طاقة حركة ابتدائية KE مهملة وعليه فطاقة حركته النهائية $KE = \frac{1}{2}mv_f^2$ تصبح مساوية 3.2×10^{-15} . وحيث أن كتلة الإلكترون $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$ فإن

$$v_f = \sqrt{\frac{3.2 \times 10^{-15} \text{ J}}{\frac{1}{2}(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})}} = 8.4 \times 10^7 \text{ m/s}$$

وكما نرى فإن هذه القيمة تقترب من سرعة الضوء $30 \times 10^7 \text{ m/s}$ والنتيجة التي حصلنا عليها بهذه الطريقة ليست دقيقة تماماً حيث أن كتلة الجسيمات لم تعد مساوية لكتلة السكون لها : (مناقشة هذا الموضوع ستكون مفصلة في الفصل السادس والعشرين) وعندما نعالج الموقف في ضوء النظرية النسبية سنجد أن $v_r = 801 \times 10^7 \text{ m/s}$ أى أنه يمكن بسهولة تعجيل الإلكترونات إلى ذلك الحد الذى تظهر فيه تأثيرات النسبية .

١٧ - ٣ - الإلكترون - فولت كوحدة للطاقة

نحتاج عند دراستنا للفيزياء الذرية إلى معرفة طاقة الإلكترون والجسيما المماثلة بشكل مستمر وفي أغلب الأحوال تكتسب هذه الطاقة من حركة الجسيمات المشحونة خلال فرق للجهد الكهربائي وعلى سبيل المثال ، فإزالة الإلكترون الوحيد ذرة الهيدروجين يجب إمداده بكمية من الطاقة تكافئ ما يمكن أن يكتسبه الإلكترون لو انحدَر في فرق للجهد مقداره 13.6 V . وبصورة أخرى فإن الطاقة اللازمة لتأين ذرة الهيدروجين أى نزع الإلكترون عنها تساوى Vq حيث $V = 13.6 \text{ V}$ بينما q هي شحنة الإلكترون $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ وهذه الطاقة تساوى $18 \times 10^{-18} \text{ J}$.

ليس من المناسب أن نضرب V فى q فى كلما تحدثنا عن طاقة جسيم انحدَر في فرق للجهد ولذا نلجأ إلى تعريف وحدة جديدة للطاقة تدعى الإلكترون - فولت (eV) تعرف هذه الوحدة كما يلي

وحدة الإلكترون فولت

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

حيث $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ هو كم الشحنة . وحيث أن طاقه شحنه q انحدرت في فرق للجهد V هي $Vq \text{ joules}$ فإننا نجد :

$$\text{الطاقة بوحدة eV} = \frac{\text{الشحنة} \times \text{فرق الجهد}}{\text{كم الشحنة}}$$

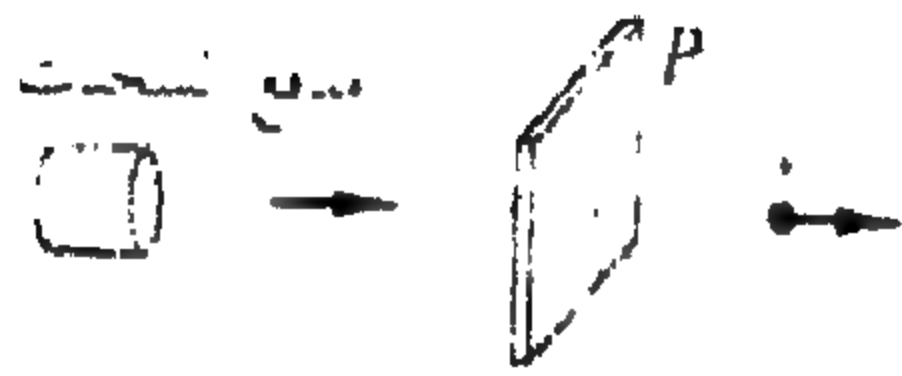
وكأمثلة نموذجيه نجد أن الإلكترون الذى ينحدَر في فرق للجهد مقداره 2 million Volts (MV) ، تكون طاقته $2 \times 10^6 \text{ eV}$ أو 2 MeV حيث تعتبر MeV عن لفظ ميغا (أو مليون) الكترون فولت . أما جسيم ألفا (وشحنته 3.2×10^{-19} أو مقدار كمان من الشحنة) فطاقته تصبح 4 MeV حين ينحدَر في فرق للجهد مقداره $2 \times 10^6 \text{ V}$. ومن الواضح أن وحدة الإلكترون فولت ليست

من وحدات SI تماماً ولذا يجب تحويلها دائماً الى وحدات الجول Joules (وذلك ضربها في 1.6×10^{-19} قبل استخدامها في المعادلات الأساسية .

١٧ - ٤ التيار الكهربائي

رأينا فيما سبق ان معظم ما عرفناه في الكهربائية قد تم على أساس الشحنات الموجبة لا السالبة : ويرجع السبب في هذا الى مايلي :

عند بداية القرن الثامن عشر (منتصف العشر الأولى من ١٧٠٠) ، عندما كانت الكهرباء مجرد فضول وحب استطلاع ، كانت الأبحاث فيها تجري كهواية فقط ، وقد كان أحد أولئك الباحثين « بنيامين فرانكلين » الذي توصل الى العديد من الاكتشافات المتعلقة بالكهرباء وكان أول من صمم عمود البرق . وبالإضافة الى ذلك كان من أوائل المؤيدين لفكرة انتقال الشحنات من البطارية خلال الأسلاك وقد افترض أن هذه الشحنات لابد أن تكون موجبة .



شكل ١٧ ٤

شعاع من الشحنات المتحركة يمر خلال ثقب في اللوح إذا مرت شحنة مقدارها ΔQ في زمن قدره Δt خلال الثقب فإن التيار يساوي $\Delta Q / \Delta t$

وقد استغرق الأمر قرابة قرن من الزمان لإثبات خطأ اختيار فرانكلين ، فنحن نعرف الآن أن الإلكترونات ، وهي شحنات سالبة ، هي التي تسري في الأسلاك على الرغم من صعوبة إثبات ذلك بطريقة مباشرة . وفي معظم التجارب يكون سريان الشحنات السالبة في أحد الاتجاهات مكافئاً لسريان شحنات موجبة في الاتجاه المضاد ، وهذا لايجعل هناك سبباً لإعادة النظر في التعريفات القائمة بحيث أننا سنظل نعطي الأولوية للشحنات الموجبة عند تعريف الكميات الكهربائية المختلفة ولنر الآن كيف يمكن تعريف معدل سريان الشحنات المتحركة .

إذا مارجعنا الى الشكل ١٧ - ٤ ، رأينا شعاعاً من الشحنات الموجبة متجهاً الى اليمين بعد انطلاقه من مدفع خاص للشحنات الموجبة . ينطلق الشعاع من ثقب في اللوح P وأمامنا الآن إيجاد تعريف لكمية تقيس عدد الشحنات التي تمر خلال هذا الثقب كل ثانية . وسندعو هذه الكمية - التيار الكهربائي الذي يحمله الشعاع كما سنرمز له بالرمز I . اذا حملت كميته من الشحنة مقدارها ΔQ عبر نقطة معينة بواسطة الشعاع ، في زمن قدره Δt فإن التيار الناتج يكون :

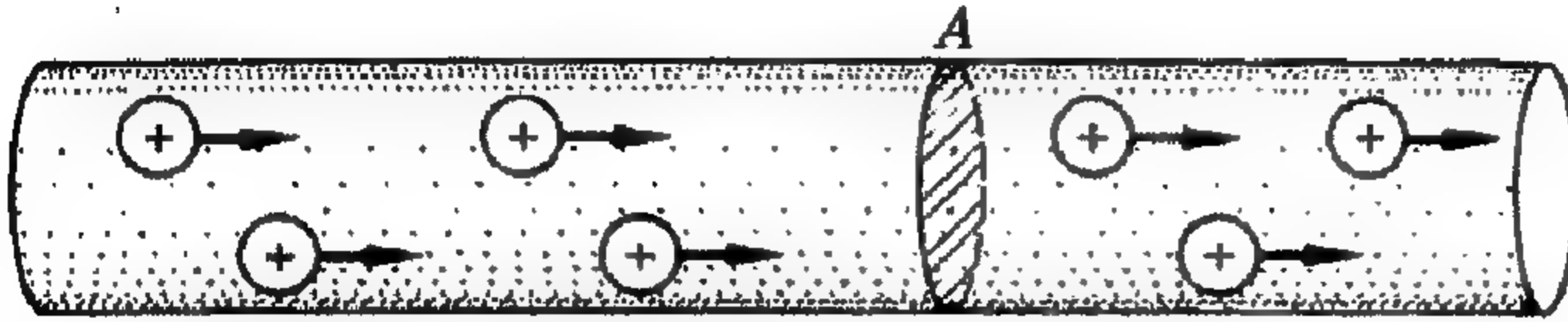
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (١ - ١٧)$$

التيار الكهربائي

وحدات التيار الكهربائي وهي كولوم لكل ثانية Coulomb per second

تعطى اسماً آخر وهو الأمبير amperes A وهنا نلاحظ انه اذا كانت الشحن المتحركة موجبة فإن كلا من ΔQ ، I سيكونان موجبين ، اما اذا كانت الشحنة سالبة كان ΔQ ، I سالبين ولهذا السبب فإن :

سريان الشحنات السالبة يؤدي الى تيار في اتجاه مضاد لاتجاه السريان على الرغم من أن اشعة الشحنات قد اصبحت شائعة (كما في اجهزة التليفزيون) إلا أننا قد اعتدنا على سريان الشحنات خلال الأسلاك ، ولمعرفة كيفية تعريف التيار في هذه الحالة فإننا نرجع الى الشكل ١٧ - ٥ . وهناك العديد من الالكترونات الحرة داخل معدن ما وعندما يؤثر مجال كهربي ، فإن هذه الالكترونات تتحرك خلال المعدن .



شكل ١٧ - ٥
يعرف التيار المار في السلك
بالأمبير على انه كمية الشحنة
الموجبة بالكولوم والتي تسرى
خلال المقطع A في ثانية
واحدة .

ويوضح الشكل هذه الحركة . وفي ضوء تأكيداتنا على الشحنات الموجبة فإن التعريف يجب أن يصاغ بدلالة الشحنات الموجبة .

تعريف
إذا كانت ΔQ كمية من الشحنات التي تمر خلال مقطع معين من سلك (مثل A في الشكل) في زمن قدره Δt ، فإن التيار المار في السلك يكون

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

التيار في سلك

ويقاس التيار بالأمبير (A) . وكما في حالة شعاع الشحنات فان التيار يكون مضادا في اتجاه سريان الشحنات السالبة . وتجدر ملاحظة ان I هي كمية الشحنة التي تمر بنقطة معينة في السلك كل ثانية بشرط ان يكون التيار منتظما .

مثال توضيحي ١٧ - ٣ يمر تيار مقداره 3.2 A خلال سلك فكم من الالكترونات تمر عبر نقطة معينة على السلك في الثانية ؟

طريقة الحل : اذا عرفنا الشحنة الكلية التي تمر عبر هذه النقطة فإنه يمكن بقسمتها على شحنة الالكترون ، معرفة عدد الالكترونات . وحيث ان I هي عدد الكولومات التي تمر عبر نقطة على السلك في الثانية فإن لدينا 3.2 C من الشحنة تمر عبر النقطة في الثانية . ولكن كل الكترون يحمل شحنة مقدارها $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ وعليه فان عدد الالكترونات التي تمر في الثانية يكون :

$$\text{العدد} = \frac{3.2}{1.6 \times 10^{-19}} = 2 \times 10^{19} \text{ الكترونا}$$

وهذا بالطبع رقم هائل جدا بحيث ان اية محاولة لتتبع أثر الكترون واحد يحرك عبر السلك تعتبر شبيهة لا طائل تحته . على ان هناك بعض الحالات التي تظهر فيها آثار واضحة

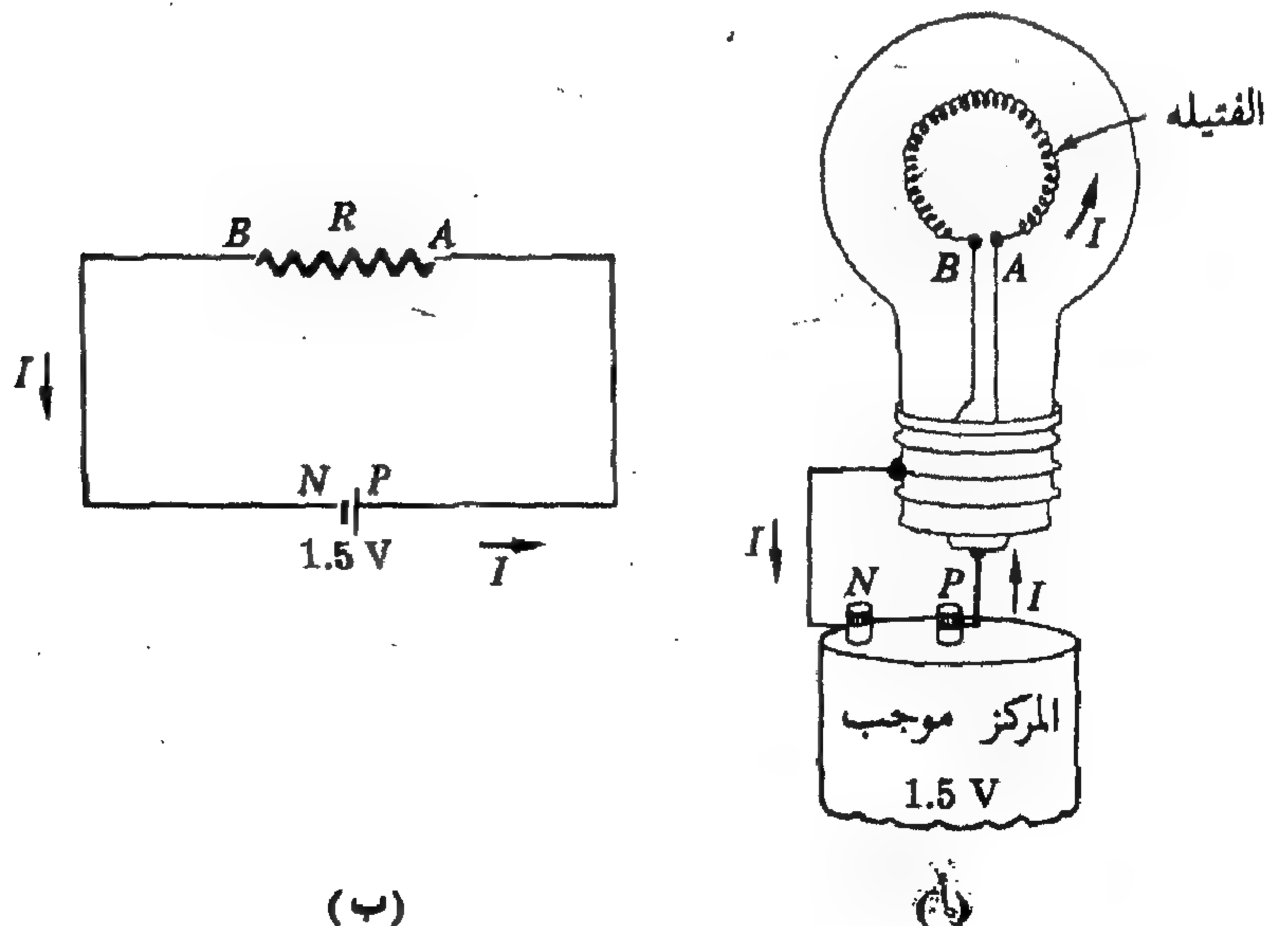
للكثرون او عدة الكترونات ، وعلى سبيل المثال يمكن لعداد « جيجر » او غرفة « ويلسون » السحايه اكتشاف الكترونات منفردة . وسنناقش هذه الأدوات في باب لاحق .

١٧ - ٥ دائرة كهربائية بسيطة

سنبدأ دراسة الدوائر الكهربائيه بفحص الدائرة البسيطة الموضحة في الشكل ١٧ - ٦ حيث يرى مصباح صغير متصل ببطاريه . يسرى التيار من البطاريه خلال فتيله المصباح ، ثم يعود الى البطاريه . وعلى الرغم من أن هذا التيار يتكون من الكترونات تسرى خارجه من الطرف السالب N ، داخله في الطرف الموجب P للبطاريه إلا أن اتجاه التيار سيكون عكس اتجاه سريان الالكترونات وهذا واضح من تعريفنا للتيار حيث أن اتجاه التيار قد عرف بدلاله الشحنات الموجبه وليس السالبه . وكما هو مدون على شكل فإن التيار I يسرى خارجا من الطرف الموجب P للبطاريه ويعبر الفتيله من A الى B ثم يعود الى البطاريه عند الطرف السالب N .

تنوهج فتيله المصباح حتى تبيض عندما يمر التيار ومن الواضح أن المصباح قد حصل على قدر من الطاقه من البطاريه ، فسريان الشحنات خلال الفتيله يولد حراره حتى تصبح الفتيله ساخنه . الى درجة البياض .

وعلى ما يبدو فإن البطاريه تعطى الشحنات طاقه تجعلها تسرى خلال الفتيله ، وعند سريانها تولد الحراره بطريقه تشبه الى حد ما طريقه تولد الحراره بالاحتكاك في منظومه ميكانيكيه .



(ب)

(أ)

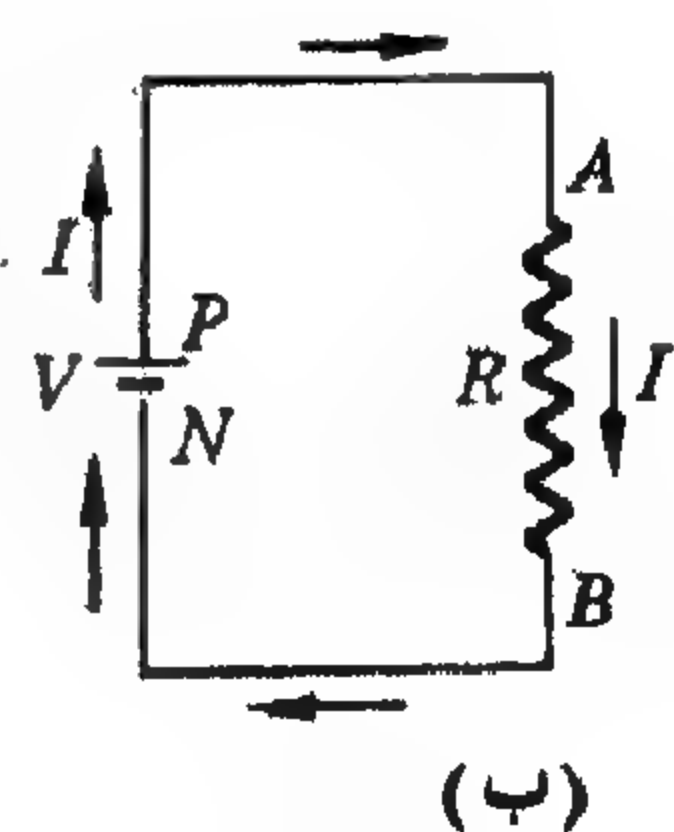
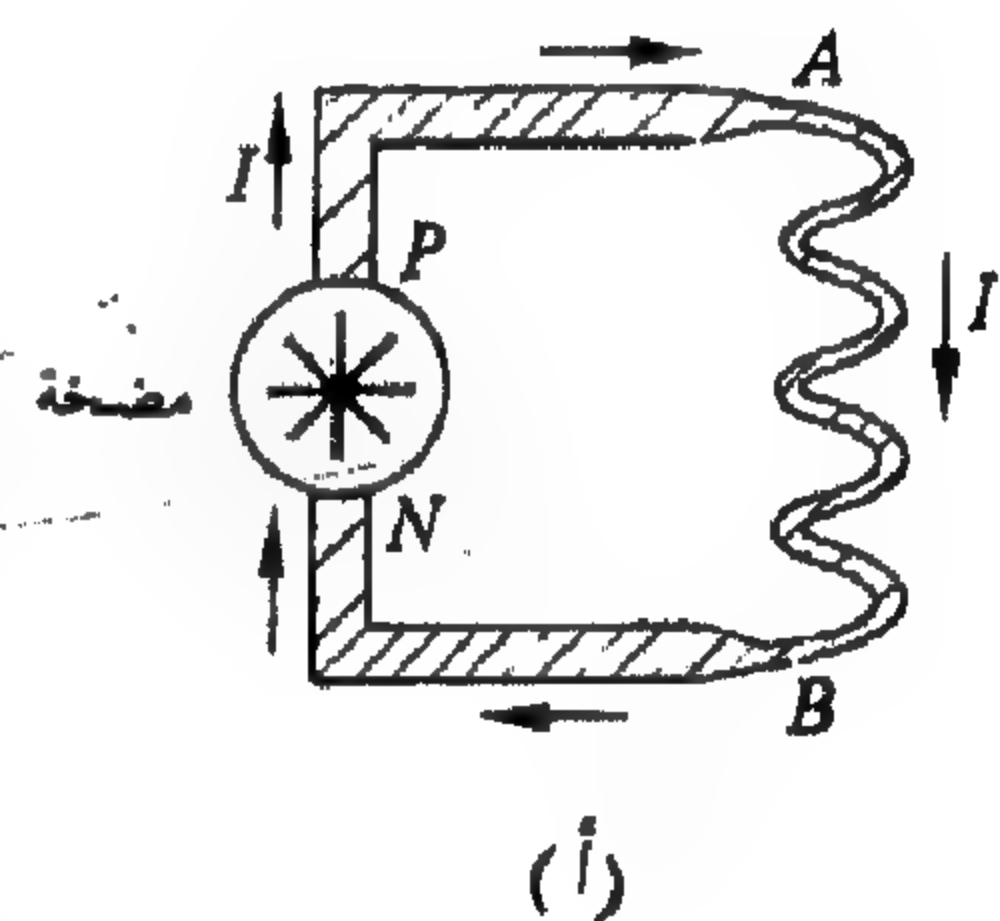
شكل ١٧ - ٦
دائرة كهربائية بسيطه
تنوهج فتيله المصباح عندما
يمر خلالها تيار كهربائي
فصبح محماه لدرجة
الايضاض

في الدائرة التي في شكل (١٧ - ١٦) تصبح الفتيله بين النقطتين A و B فقط ساخنه ، أما التيار المار خلال الأسلاك الأخرى (أسلاك التوصيل من P الى A ومن B الى N) فيسبب تسخيننا مهملا . ويرجع ذلك الى عاملين : (١) أن سلك الفتيله أدق بكثير عن الأسلاك الأخرى و (٢) أن مادة الفتيله ذات مقاومه عاليه لسريان الشحنات خلالها . وهذه المقاومه اكبر بكثير من المقاومه الكهربائيه للأسلاك الأخرى . تعتبر الطاقه الحراريه المتولده في أسلاك التوصيل مهمله في كثير من الأغراض والتطبيقات وفي هذه الحاله يمكن اعتبار يمكن مقاومه أسلاك التوصيل مهمله .

الدائرة المرسومه في شكل ١٧ - ١٦ ترسم عادة كما هو واضح في الجزء (ب) اي تعريف سلك يقوم فيه التيار بتوليد كمية محسوسه من الحراره يسمى مقاوم وفي الحاله الراهنه يعتبر الفتيله بمثابة مقاوم . ويمكننا تمثيل انواع المقاومات بالرمز رمز المقاومه \sim (رمز المقاومه) وقد استخدم هذا الرمز في الجزء (ب) لتمثيل الفتيله ، أما أسلاك التوصيل وهي فعليا عديمه المقاومه فإنها تمثل بخطوط مستقيمه تصل الى البطاريه . ونلاحظ هنا ان التيار يسرى من الطرف الموجب للبطاريه الى الطرف السالب

يمكننا توضيح بعض ملامح الدائرة في شكل ١٧ - ٦ إذا ما قارناها بنظام مائي مشابه . فإذا اعتبرنا ، على سبيل المثال . النظامين الموضحين في الشكل ١٧ - ٧ فإننا نجد ان الجزء (أ) يتكون من مضخه تدفع الماء ليسرى خلال مجموعه من الأنابيب . وكل من المضخه والأنابيب مملوءه تماما بالماء . وعلى هذا ، فإذا دفعت المضخه قليلا من الماء في الأنبوبه عند P فإن كمية مساويه يجب أن تسرى لتعود الى المضخه عند N كما أن كمية مساويه من الماء يجب أن تسرى عبر النقطه A خلال الأنبوبه الضيقه . ومن الطبيعي أن نفس الكمية من الماء يجب أن تخرج من الأنبوبه الضيقه عند B . وكما نرى فإن كمية الماء التي تسرى عبر النقط A ، N ، B ، P في كل ثانيه يجب أن تكون متساويه . ولما كانت كميه الماء التي تمر عبر نقطه ما كل ثانيه هي التيار ، لذا كان التيار المائي I في هذه الحاله متساويا في جميع نقط الدائرة المائيه .

يمكننا تطبيق نفس الإعتبارات السابقه على الدائره الكهربائيه الموضحه في الجزء (ب) فالأسلاك « ممتلئه » بالشحنات (الإلكترونات) وهي تقوم بدور جزيئات الماء في الانابيب . بمعنى انها تمثل سائلا غير قابل للانضغاط يسرى مثلما يسرى الماء في انابيب الجزء (أ) . (تنعكس هذه الحقيقه في مصطلحات العاملين بالكهرباء حين يتحدثون عن « العصور » الموجود في الأسلاك) ويمكننا على الفور استنتاج أن التيار I في الدائرة الكهربائيه متساو في جميع نقط هذه الدائرة البسيطه .



شكل ١٧ - ٧
النظام المائي في (أ) يشبه
النظام الكهربائي في (ب)
نلاحظ ان المضخه والبطاريه
هما مصادرا للطاقه .

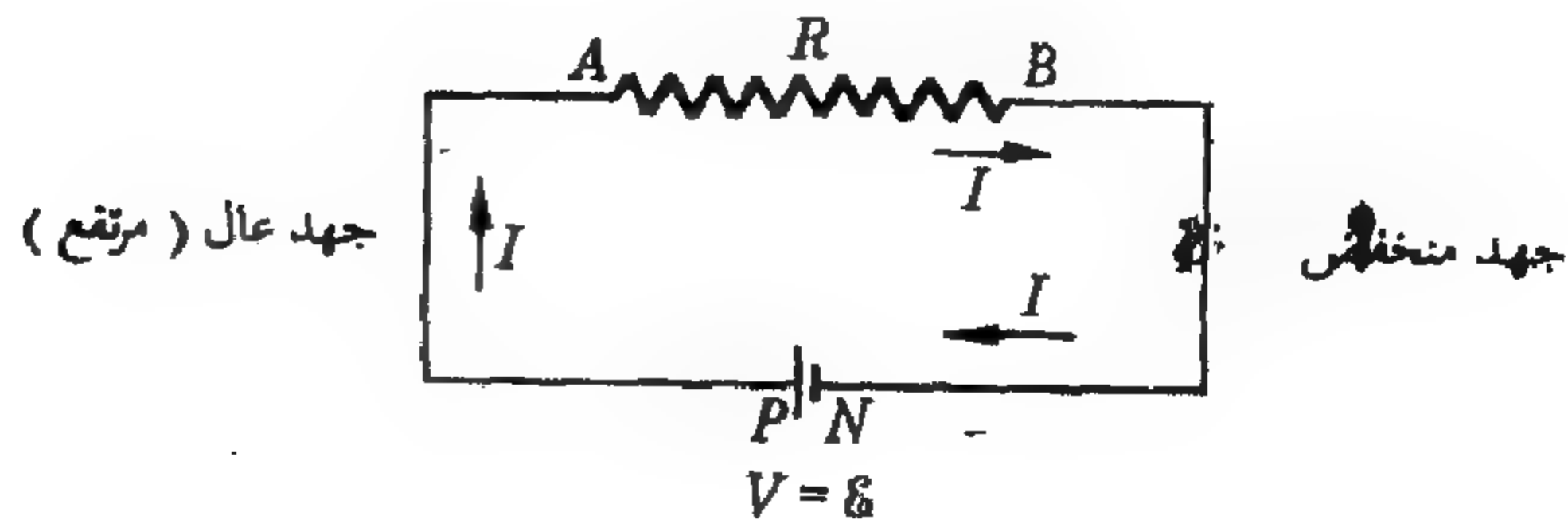
هناك نقطة هامة أخرى تجب ملاحظتها حول الدوائر في شكل ١٧ - ٧ . قلنا أنه عندما تغادر كمية ضئيلة من الماء المضخة عند P فإن كمية مساوية تدخل عند N وبالمثل في الدائرة الكهربائية فإنه إذا سرت كمية ضئيلة من الشحنات خارجة من البطارية عند P فإن كمية مساوية تدخلها عند N . ويحدث هذا الأمر لحظيا تقريبا . على أننا نلاحظ ان الشحنات التي تغادر P ليست هي نفس الشحنات التي تدخل عند N ولكن ما يحدث هو أن كل الشحنات داخل السلك تتحرك داخل السلك مسافة معينة . وان كميات متساوية تدخل وتغادر عند الطرفين .

من المفيد ان نفحص الطاقة في كل من الدائرتين . هناك شغل يجب بذله في الدائرة المائية لدفع الماء خلال الأنبوب الدقيق المتعرج . وهذه الأنبوبة تشكل مقاومة كبيرة جدا لسريان الماء في الانابيب الاكبر . وبمكتنا على هذا تجاهل تأثيرات المقاومة الناتجة عن الانابيب الكبيرة . والشغل المبذول في دفع الماء خلال الأنبوب الضيق يفقد من خلال شغل لزوجي (او احتكاكي) وتنشأ عن هذا كمية من الحرارة في أنبوبة المقاومة مساوية لكمية الشغل المفقود . وكما ترى فإن الطاقة التي أتاحها المضخة للماء فقدت على هيئة شغل احتكاكي في أنبوبة المقاومة او أن الطاقة التي امدتها المضخة ظهرت على هيئة حرارة في أنبوبة المقاومة .

وموقف مشابه هو ما يحدث في الدائرة الكهربائية . تقوم البطارية بامداد الشحنات بالطاقة اللازمة لدفعها خلال اسلاك المقاومة . وتفقد هذه الطاقة لتظهر كمية من الحرارة عندما تمر الشحنات خلال المقاوم . وكما في الدائرة المائية يتولد قدر مهمل - عادة - في أجزاء الدائرة من P الى A ومن B الى N وهذه الاجزاء هي اسلاك التوصيل التي تشكل مقاومة مهملة لسريان الشحنات

١٧ - ٦ قانون أوم

لنفحص الآن هذه الدائرة البسيطة حتى نحصل على علاقة كمية تربط بين التيار ، وجهد البطارية ومقاومة السلك . سنعيد رسم الدائرة في شكل ١٧ - ٨ . نلاحظ ان ذلك الجزء من الدائرة من P الى A قد ميز بتعبير « جهد عال » بينما الجزء من B الى N بتعبير « جهد منخفض » والسبب في هذا كما يلي :



شكل ١٧ - ٨

يسرى التيار دائما من الجهد العالي الى الجهد المنخفض خلال مقاومة . القوة الدافعة الكهربائية للبطارية عديمة المقاومة هي ϵ

اعتبر ان هناك شحنة موجبة في نقطة P من الدائرة وهي بهذا عند نفس الجهد الذى للطرف الموجب للبطارية . وهو V volts (فولت) فوق جهد النقطة N . عندما تتحرك الشحنة عبر السلك عديم المقاومة من P الى A فإنها لا تفقد أى قدر من طاقتها لأن الطاقة الحرارية المتولدة في هذا السلك مهملة ، وعليه فإنها حين تصل الى النقطة A تكون عند نفس الجهد الذى للنقطة P أى أن جزء الدائرة كله من P الى A يقع عند نفس قيمة الجهد أو أن هذا الجزء موجود عند نفس المستوى الكهربائى .

على أن النقطة N تقع عند جهد يقل بمقدار V volts (فولت) عن جهد النقطة P وحيث أن جزء الدائرة من N الى B عند نفس المستوى الكهربائى فإننا نستنتج أن جهد هذا الجزء بأكمله يقل بمقدار V Volts (فولت) . ولما كانت الشحنات الموجبة تتحرك من نقط ذات جهد مرتفع الى نقط ذات جهد منخفض فإنه ليس من المدهش أن التيار (وهو سريان الشحنات الموجبة) يتجه من A الى B وبالفعل فإن : التيار يسرى دائما خلال مقاوم ما من طرفه ذى الجهد المرتفع الى الطرف الآخر ذى الجهد المنخفض .

لقد أصبح لدينا الآن ما يكفى من الخبرة لتقبل حقيقة هامة اكتشفها اول مرة جورج سيمون اوم (١٧٨٧ - ١٨٥٤) (Georg Simon Ohm (1787-1854) . لقد وجد بالتجربة ان التيار المار في مقاوم ما يتناسب طرديا مع فرق الجهد بين طرفيه . وعلى سبيل المثال ، ففي شكل ١٧ - ٨ وجد ان .

حيث V هو فرق الجهد بين طرفى المقاوم ، واذا ماضوعف جهد البطارية فإن التيار أيضا يتضاعف .

$$I \propto V$$

والعامل الآخر الذى يؤثر في التيار هو قيمة المقاومة لهذا المقاوم ونحن نطلق على هذا التأثير المقاومة R للمقاوم . وتعرف المقاومة R على النحو التالى : اذا سبب فرق للجهد V عبر مقاوم ما تيارا قيمته I فإن مقاومة المقاوم تكون :

$$R = \frac{V}{I}$$

ووحدة المقاومة هي فولت لكل أمبير ويرمز لها بالرمز أوم (Ω) Ohm . والمعادلة المستخدمة للتعريف تكتب احيانا على الصورة

$$V = IR$$

(١٧ - ٢)

قانون أوم

وتسمى قانون أوم Ohm's law على أن Ohm أوم افترض ان R لا تتغير بتغير فرق الجهد عبر المقاوم وهذا صحيح في أغلب الأحوال ولكن ليس دائما كما سنرى فيما بعد . وعلى الرغم من أى شيء فإن المعادلة (١٧ - ٢) صحيحة دائما اذا ما اعتبرنا أن R معروفة بها .

مثال توضيحي (١٧ - ٤) : اذا كان المصباح الكهربائي في الشكل ١٧ - ٦ يسحب تيارا قدره $0.25A$ حينما يتصل عبر بطارية قيمتها $1.5V$ فكم تكون مقاومة المصباح تحت هذه الظروف ؟

طريقة الحل : سنستعين مباشرة بقانون أوم (معادلة ١٧ - ٢) . إذا كان فرق الجهد عبر المصباح هو $V = 1.5V$ وكان التيار $I = 0.25$ فإن

$$V = IR$$

تصبح

$$R = \frac{1.5 V}{0.25 A} = 6.0 \Omega$$

اى ان مقاومة المصباح الساخن هي 6Ω وسنرى فيما بعد أن مقاومة المصباح تكون أقل بكثير حين لا يكون على هذه الدرجة من السخونة .

١٧ - ٧ وضع أجهزة القياس في الدائرة

لقد أشرنا فيما سبق الى أن اسلاك التوصيل في دائرة ما لها مقاومة منخفضة فعلى سبيل المثال تبلغ مقاومة سلك منزلى عادى قيمة $10^{-3} \Omega$ لكل متر طولى وهذه المقاومة مهملة كما سنرى .

عندما نرسم دائرة كهربائية نرسم للمقاومه فيها بالرمز \sim كما وضعنا سلفا . ان كل الأسلاك في الدائرة ١٧ - ٦ ، ١٧ - ٨ تعتبر قيمتها مهملة فيما عدا تلك المميزة بهذا الرمز وعليه فلا يمكن لأي فرق للجهد ان يوجد عبر سلك لا مقاومة له ، وذلك لأن قانون أوم قد نص على أن

$$V = IR$$

فاذا كانت $R=0$ فإن V ايضا يجب أن تساوى صفرا .

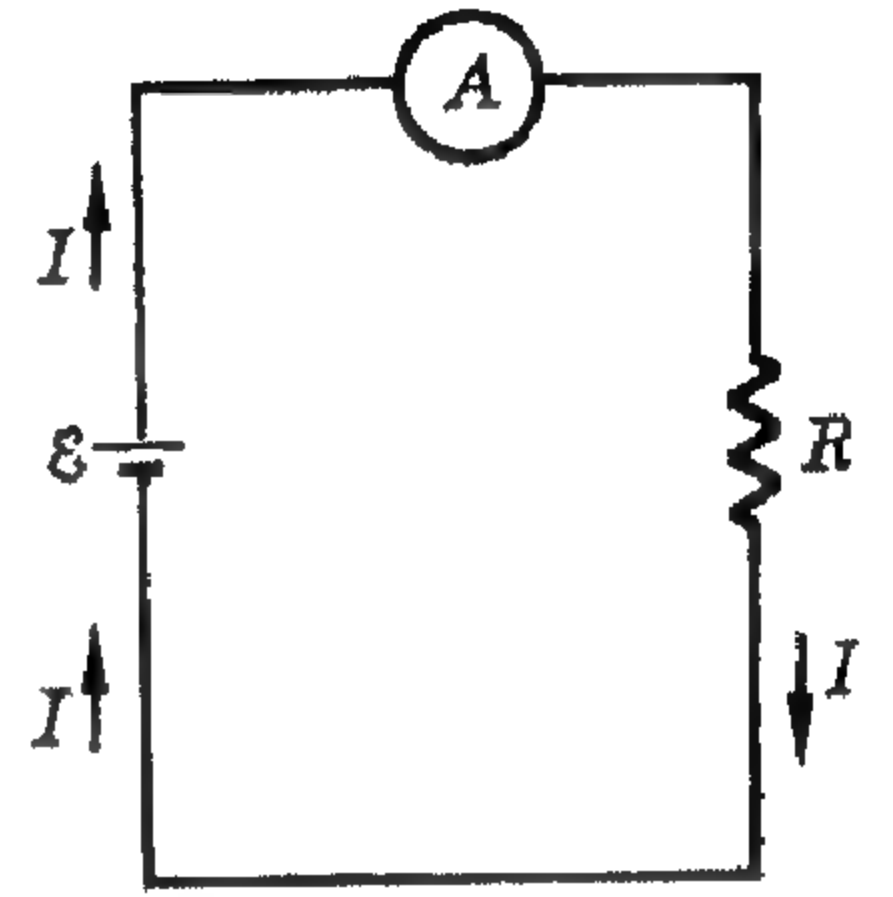
وكثيرا مايود الإنسان ان يقيس التيار الذى يسرى في سلك ما ولذا فهو يستعمل الأميتر *ammeter* . وعمل هذا الجهاز من داخله سيناكش في الفصل العشرين وسنكتفى حاليا بالقول انه يسجل كميه الشحنة التى تمر خلاله في الثانية الواحدة او التيار مثلما يفعل عداد استهلاك المياه .

الفرض من الأميتر

في شكل ١٧ - ٩ يسرى نفس التيار في جميع أجزاء الدائرة . (ولإيضاح هذا ، اعتبر خطاً من انابيب المياه ، فلو لم يكن هناك تسرب من أى نوع ، فإن نفس كمية الماء يجب أن تسرى خلال كل انبويه) . وعلى هذا فالأميتر الموجود في الدائرة بالطريقة الموضحة في شكل (١٧ - ٩) سيسجل التيار المار في أى سلك من الدائرة ، وتلاحظ أن كل التيار يسرى خلال الأميتر ويقال هنا أنه متصل على التوالي مع الدائرة .

الفرض من الفولتميتر

يلزمنا من وقت لآخر ان نقيس فرق الجهد بين نقطتين .. ولذا نلجأ لاستخدام الفولتميتر . إذا أردنا أن نقيس فرق الجهد بين طرفي المقاوم في الشكل ١٧ - ٩ (او ما يسمى بهبوط الجهد عبر المقاوم) فإننا نوصل الفولتميتر كما هو موضح في الشكل ١٧ - ١٠ . وعلينا أن نقارن هذا الشكل بالشكل السابق ١٧ - ٩ بعناية . الفولتميتر المثالي يجب ان تكون مقاومته لانهايه حتى لا يمر بداخله أى تيار فيؤدى ذلك الى الإخلال بالدائرة المتصل فيها كما في الشكل ١٧ - ١٠ .



شكل ١٧ - ٩

يتصل الأميتر على التوالي مع المنبع لقياس التيار المار خلال السلك ويجب ان تكون مقاومة الأميتر منخفضة جداً . لماذا ؟

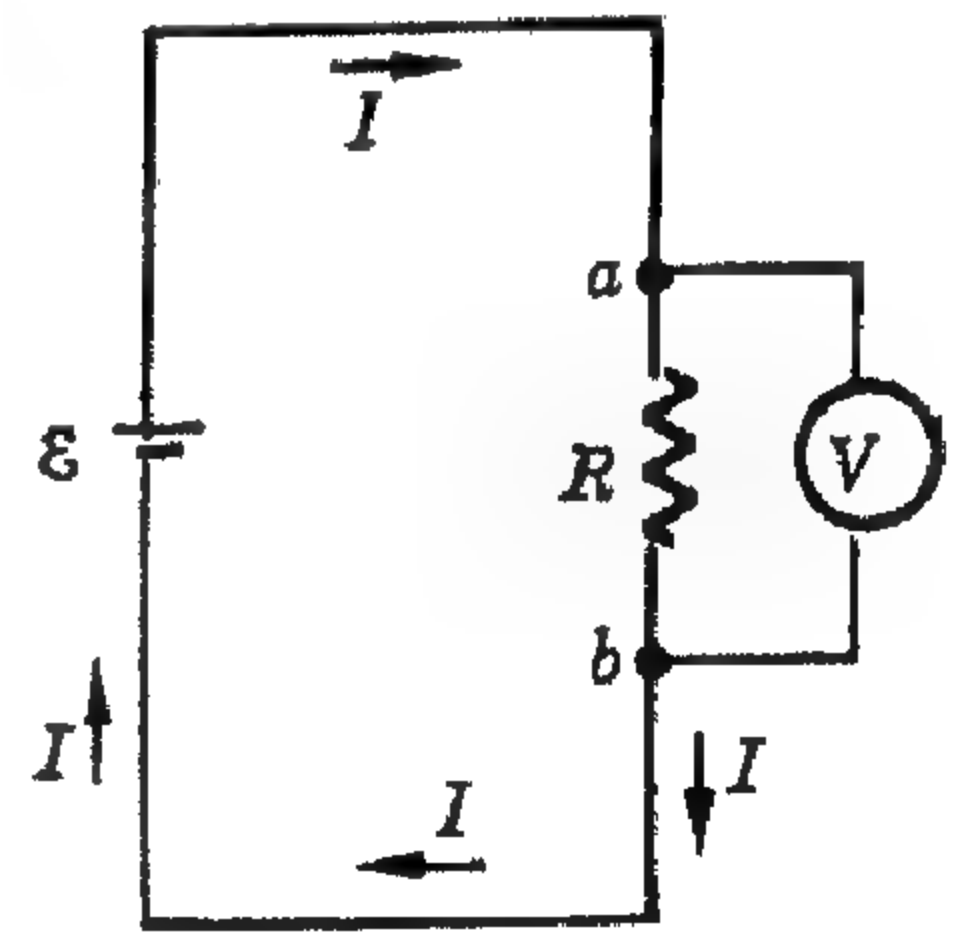
ومن ناحية أخرى فان الأميتر المثالي يجب أن تكون مقاومته صفراً حتى لا تختل دوائره حينما توصل كما في شكل ١٧ - ٩ . وهناك خطأ سيء يقع فيه بعض الطلاب أحيانا عندما يوصلون الأميتر بإهمال مكان الفولتميتر في شكل ١٧ - ١٠ . وحيث ان فرق الجهد بين النقطتين a و b هو ε ، فإن التيار خلال الأميتر يصبح * .

$$I = \frac{V}{R_{am}} = \frac{\varepsilon}{0} \rightarrow \infty$$

وبذا يتلف الأميتر . ويتحطم . ولما كانت مقاومة الأميتر ضئيلة للغاية لذا فهو غير قادر . على أن يحد من التيار المار خلاله - وهذا التيار من الكبر بحيث يقوم بتسخين الأسلاك داخل الأميتر لدرجة تجعل الجهاز يحترق .

١٧ - ٨ المقاومة واعتمادها على درجة الحرارة

ليست كل المواد موصلات جيدة للكهرباء ، بل أن هناك فرقا بين قدرة المعادن المختلفة على توصيل التيار . ولذا فنحن في احتياج الى كمية محددة نتجربنا بدقة عن مدى جودة المادة كموصل للتيار أو أن نتمكن - إذا أردنا - من أن نصف مادة ما بكبر مقاومتها وسنستخدم في الواقع هذه الطريقة الأخيرة فيما يلي :



شكل ١٧ - ١٠ . لقياس فرق الجهد بين a و b فإننا نوصل الفولتميتر كما هو موضح والفولتميتر يجب أن تكون مقاومته كبيرة جداً . لماذا ؟

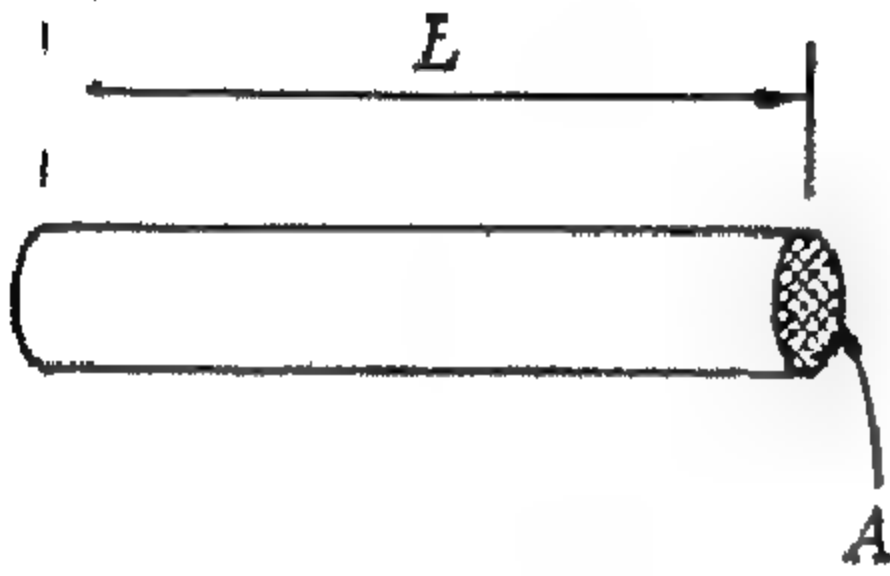
افترض ان لدينا قطعة اسطوانية الشكل من سلك ما كما في الشكل (١٧ - ١١) . مقاومة هذا الجزء وطوله (L) تعتمد على طول السلك ومساحة مقطعة .

وحيث أن سلكا له ضعف الطول يتوقع أن تكون له ضعف المقاومة ، لذا فالمقاومة تتناسب طرديا مع L بالإضافة الى هذا ، كلما زادت مساحة المقطع A ، قلت المقاومة . وعليه فالمقاومة R تتناسب عكسيا مع A . وإذا عبرنا عن هذا بمعادلة فإن :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (١٧ - ٣)$$

وثابت التناسب هنا هو ρ (الحرف الاغريقي « رو ») هو خاصية للمادة التي صنع السلك منها . تسمى هذه الخاصية مقاومة المادة . فإذا ما كانت كبيرة ، فإن المادة تكون موصلا رديئا . والآن اذا حللنا المعادلة سعيا وراء ρ فإن :

$$\rho = R \frac{A}{L}$$



وتكون وحداتها هي ohm - meters أو حاصل ضرب الأوم في وحدات الطول . يحتوى الجدول ١٧ - ١ على مقاومات المواد المختلفة ونلاحظ أن النحاس والفضة هما أفضل الموصلات المذكورة ومن هنا يتضح سبب صنع معظم الأسلاك من النحاس .

قد تستخدم أحيانا كمية أخرى تسمى الموصلية لوصف الخواص الكهربائية للمعادن والموصلات الأخرى وهذه الكمية تكافئ $1/\rho$ ، أى أنها تمثل مقلوب المقاومة .

شكل ١٧ - ١١
تناسب مقاومة سلك منتظم
تناسبا طرديا مع طوله L
وعكسيا مع مساحة مقطعة
A.

جدول ١٧ - ١
المقاومات ومعاملاتها مع درجات الحرارة

المادة	ρ AT 20°C, Ωm	α AT 20°C, $^{\circ}C^{-1}$
فضة	1.6×10^{-8}	4.1×10^{-3}
نحاس	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
الومينوم	2.8×10^{-8}	4.0×10^{-3}
تنجستن	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
حديد	10×10^{-8}	6.5×10^{-3}
جرافيت (كربون)	3500×10^{-8}	-0.5×10^{-3}

سنلاحظ أن المقاومة المذكورة في الجدول (١٧ - ١) عند درجة حرارة معينة وهى ٢٠ م (20°C) . وسبب هذا هو أن مقاومة الأسلاك تتغير بشكل ملحوظ مع درجة الحرارة . على انه في مدى محدود من درجات الحرارة ، يمكن تمثيل المقاومة بمعادلة على النحو التالى :

تغير المقاومة مع درجة الحرارة

$$\frac{\rho - \rho_{20}}{\rho_{20}} = \alpha_{20}(t - 20^\circ)$$

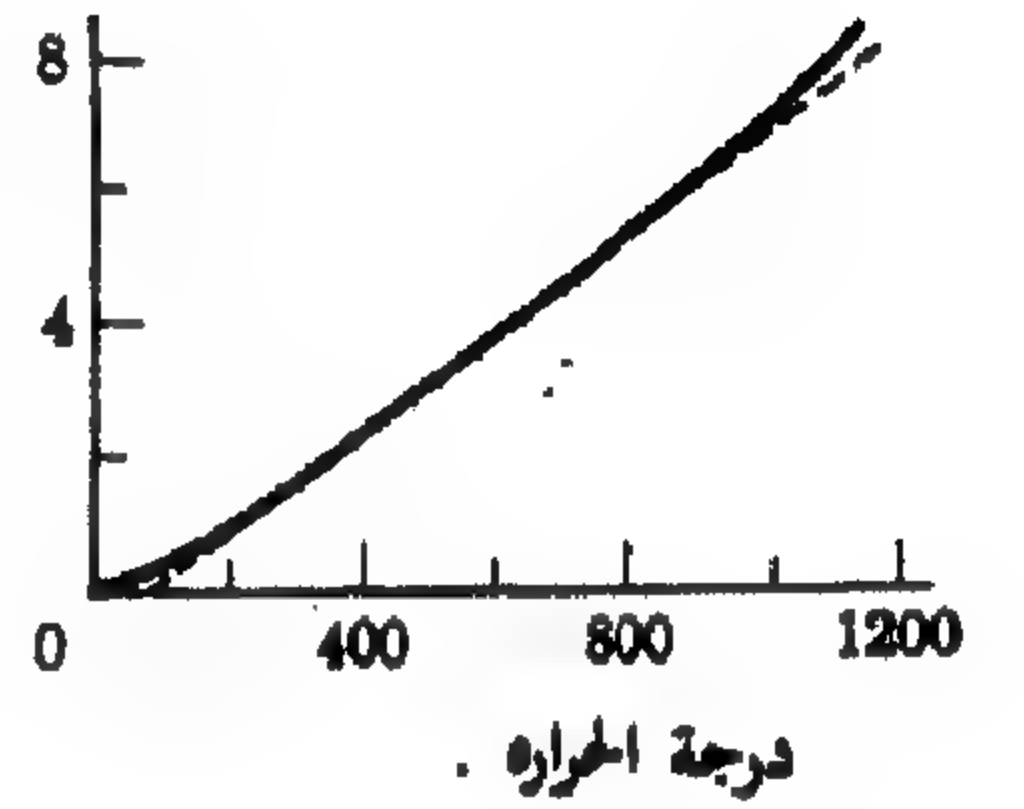
أو

$$\frac{R - R_{20}}{R_{20}} = \alpha_{20}(t - 20^\circ)$$

حيث t هي درجة الحرارة المئوية .

في كلتا المعادلتين تستعمل قيم المقاومة (والمقاومة) عند 20°C (R_{20}) وذلك كقيم مرجعية . وخارج القسمة المعطى في كل حالة يمثل التغير الكسرى في المقاومة (أو المقاومة) ومعامل درجة الحرارة للمقاومة α يعتبر مقياسا لمدى تغير المقاومة مع درجة الحرارة ، فإذا كانت α صفرا فإن المقاومة تكون ثابتة . ويوضح الجدول (١ - ١٧) بعض القيم النموذجية للمقدار α .

من الواضح أن قيمة α المستخدمة في المعادلة (١٧ - ٤) يجب أن تقاس عند درجة الحرارة التي اتخذت مرجعا لقياس المقاومة . وفي بعض الأحيان تستخدم درجات حرارة أخرى (غير 20°C) كمراجع وهنا يجب أن تتغير المعادلة (١٧ - ٤) بالتبعية . يوضح الشكل ١٧ - ١٢ كيفية تغير مقاومة النحاس مع درجة الحرارة . ويلاحظ هنا أن التغيرات التي تطرأ على المقاومة مع درجة الحرارة هي فعلا كبيرة جدا .



شكل ١٧ - ١٢

المقاومة الفعلية للنحاس موضحة على الرسم بمنحنى مستمر أما الخط المستقيم فتمثل بخط منقطع

ولو أن معادلة مثل المعادلة (١٧ - ٤) كانت صحيحة تماما لتغير الرسم الموجود في الشكل (١٧ - ١٢) ولأصبح خطا مستقيما . وفي الواقع فالرسم ذو انحناء بسيط وعليه فالمعادلة (١٧ - ٤) صحيحة بشكل تقريبي فقط إذا ما اعتبرنا فترات أطول من درجات الحرارة .

مثال توضيحي ١٧ - ٥ : قضيب من الحديد على هيئة متوازي مستطيلات ومساحة مقطعه $2 \times 2 \text{ cm}$ وطوله 40 cm . كم تبلغ مقاومته ؟
طريقة الحل : نعرف أن

(١٧ - و)

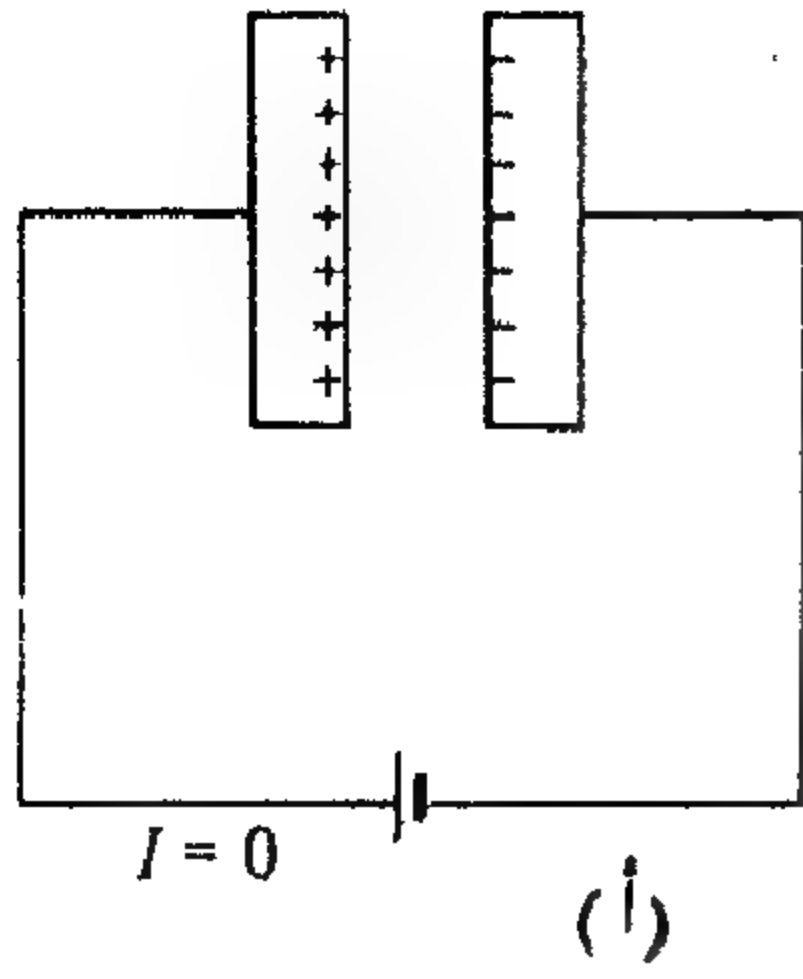
$$R = \rho \frac{L}{A}$$

من الجدول (١٧ - ١) نجد أن : $P = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m}$. ولذلك :

$$\text{عند درجة } 20^\circ \quad R = (1 \times 10^{-7}) \left[\frac{0.40}{(0.02)(0.02)} \right] = 1 \times 10^{-4} \Omega \quad (١٧ - ز)$$

في هذه المعادلة يجب وضع الأبعاد الصحيحة لتحقيق الإجابة بالوحدات المعطاة .

مثال توضيحي ١٧ - ٦ عند درجة الحرارة 520°C ، ماهي مقاومة القضييب الذي ذكر في المثال السابق ؟
طريقة الحل : باستعمال البيانات المدرجة في الجدول (١٧ - ١) وكذا نتائج المثال السابق فإن :

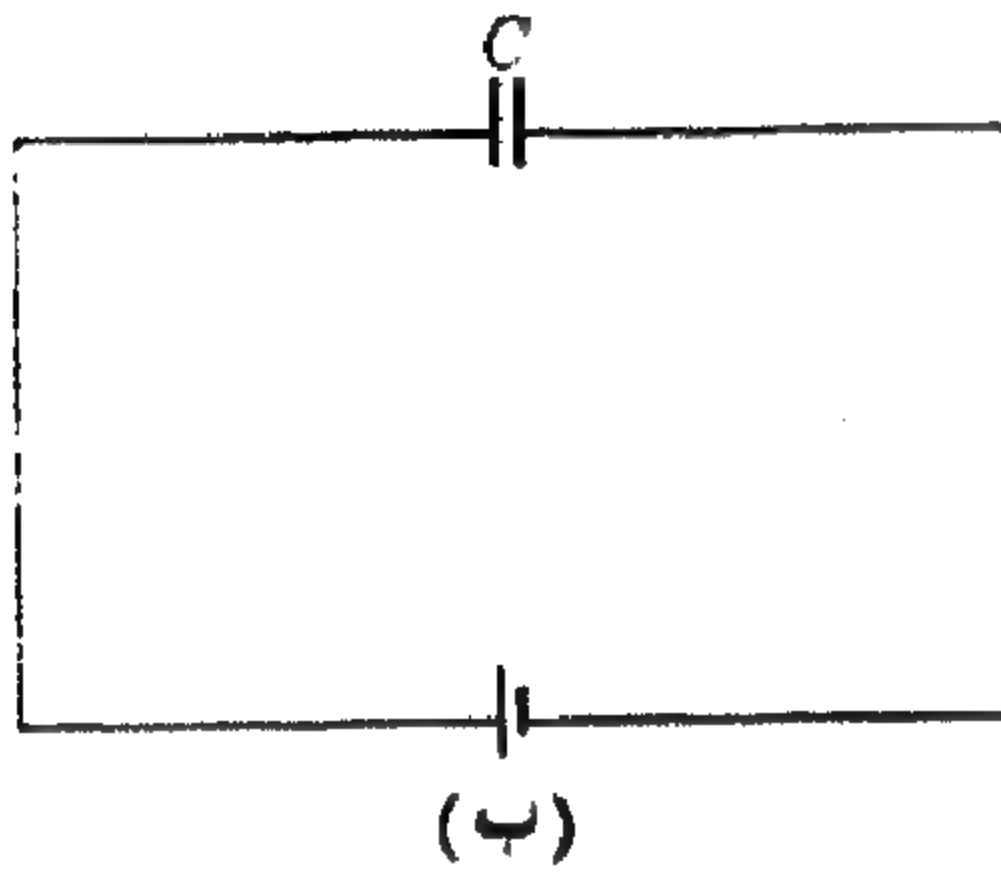


$$(١٧ - ح) \quad \frac{R - R_{20}}{R_{20}} = \alpha_{20}(t - 20)$$

$$(١٧ - ط) \quad \frac{R - 1 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-4}} = (6.5 \times 10^{-3})(520 - 20)$$

ومنها

$$(١٧ - ي) \quad R = 4.3 \times 10^{-4} \Omega$$



أى أن مقاومة القضييب عند هذه الدرجة تبلغ $4.3 \times 10^{-4} \Omega$ مرة أكبر عن القيمة عند 20°C

شكل ١٧ - ١٣

الشحنات المتساوية والمتضادة تكون على الأوجه الداخلية للألواح المكثف وتلاحظ الرمز المستعمل للتعبير عن المكثف في (ب)

١٧ - ٩ المكثفات

يتكون أبسط أنواع المكثفات من لوحين معدنيين متوازيين . ويوضح الشكل (١٧ - ١٣) كيف يتصل مثل هذا المكثف ببطاريه ، حيث يقوم الطرف الموجب للبطارية بوضع شحنات موجبه على أحد الألواح بينما يشحن الطرف السالب اللوح الآخر بشحنة سالبة . تقوم هذه الشحنات بجذب بعضها البعض ولذا فهي تستقر على الأسطح الداخلية للألواح ، كما هو موضح . والمكثف بهذا التركيب هو أداة قادرة على تخزين الشحنات . وكما يبين الشكل في الجزء (b) فإن الرمز المستعمل للمكثف هو $\text{---}||\text{---}$ أو أحيانا $\text{---}||\text{---}$

إن مايعنينا الآن هو كم من الشحنة Q يستقر على أحد الألواح وليكن الموجب . (من الطبيعي أن شحنه سالبه مساوية للموجبه توجد على اللوح السالب نظراً لكون المجموعه متعادلة كهربائياً) . تعتمد كمية الشحنة على اللوح على عدد من العوامل . اولاً ، كلما زاد جهد البطارية زادت الشحنات التي يمكن أن تضعها على المكثف . وعليه فإذا كان V هو فرق الجهد عبر المكثف فإن :

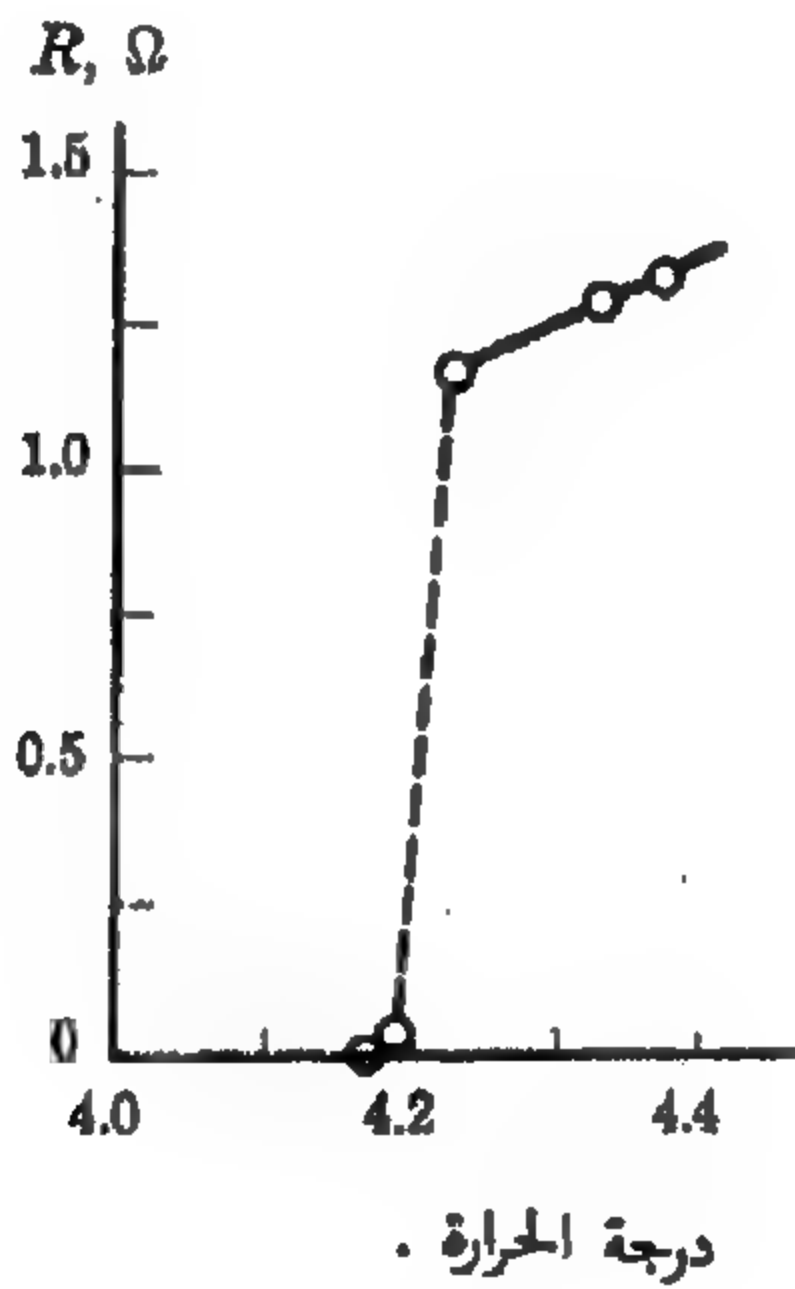
$$Q \propto V$$

مفرطات الموصلية

من المعروف ان الموصلات العادية للكهرباء تصبح اجود توصيلا كلما انخفضت درجة الحرارة ، وقد عرفت هذه الحقيقة منذ 1835 من القياسات التي قام بها هاينرش لنز Heinrich Lenz وفيما تلا ذلك من سنوات كان هناك تخمين بأن مقاومة المعادن قد تصل فعليا الى الصفر عند الصفر المطلق ، أى عند -273°C أو 0°K . على انه لم يستطع احد أن يجرى تجربة لقياس المقاومة عند درجات الحرارة المنخفضة جدا الا بعد فترة طويلة جدا حيث أن الوسائل المتاحة للتبريد لم تكن تكفى .

وقد لقيت ابحاث الوصول لدرجات حرارة منخفضة جدا دفعة قوية في عام ١٨٨٣ حين تمكن فرويلوفسكى واولفسكى Wroblewski, Olzewski من إسالة الهواء وحين استخدم الهواء السائل كعامل مساعد أصبح من الممكن اجراء تجارب عند درجة غليان الاكسجين (-183°C) وعند درجة غليان النيتروجين (-196°C) . وتمكن جيمس ديوار James Dewor عقب ذلك مباشرة في ١٨٩٨ (1898) من إسالة غاز الايدروجين وهو يغلي عند (-263°C) أو 10°K وبقي غاز واحد استعصى على الإسالة وهو غاز الهليوم . وقد امكن اسالته في ١٩٠٨ بواسطة هايك كامرلنج أونيس HeiKe Kamerlingh Onnes (١٨٥٣ - ١٩٢٦) ، ووجد أن سائل الهليوم يغلي عند 4.2k .

وقد استطاع أونيس باستخدام الهليوم السائل الوصول الى درجات حرارة منخفضة لم يمكن من قبل الوصول اليها ، ومن ثم استطاع قياس مقاومة المعادن عند درجات حرارة منخفضة جدا . وتقنية القياسات كانت بسيطة للغاية من حيث المبدأ ، بينما كانت صعبة من الناحية العملية بسبب صعوبة تثبيت درجات الحرارة لما كانت المقاومة R قد عرفت بقانون أوم ، فكان على « أونيس » ان يقيس فرق الجهد V عبر أسطوانة معينة من المعدن عندما يمر بها تيار محدد قيمته I وتكون $R = V/I$. وقد استخدم الزئبق في هذه القياسات على أنه المعدن المطلوب (يتجمد الزئبق عند -39°C ولذا فهو من الجوامد) . عندما اجريت التجربة المطلوبة عام ١٩١١ ، حصل « أونيس » على النتائج المذهلة ، والموضحة في الشكل .



نتائج هـ كامرلنج أونيس
(١٩١١) لمقاومة الزئبق عند
درجة حرارة قرب 4°K كانت
المقاومة عند (273°C)
تقريبا ، حوالي $60\ \Omega$.

على الرغم من أن المعدن اخذ يقترب بالتدريج من مقاومة منخفضة جدا كلما انخفضت درجة الحرارة ، إلا انه عند 4.2°K تضاءلت المقاومة فجأة الى الصفر وأصبح الزئبق مانشر اليه اليوم بأنه مفرط الموصلية . وقد أشارت التجارب المتتالية الى ان التيار يمكن أن يسرى الى الأبد في حلقة من مادة مفرطة الموصلية حتى لو كان مصدر القوة الدافعة الكهربائية غير موجود ، وإلى المدى الذى يمكن للتجربة العملية ان تؤكد انه فإن مقاومة مفرط الموصلية هي بالضرورة صفر .

ونجح كاميرلنج اونيس فيما بعد في بيان أن الرصاص ، والقصدير والاندسيوم هي ايضا تصبح مفرطة التوصلية عند الدرجات 7.2K ، 3.7K ، 3.4K على الترتيب . ومنذ ذلك الحين ، اكتشف العديد من مفرطات التوصلية . واكثر الامور أهمية هو أن بعض السبائك تصبح مفرطة التوصلية عند درجات حرارة مرتفعة نسبيا ، وعلى سبيل المثال ، فالمركب Nb_3Sn يصبح مفرطا في التوصلية عند 17.9K . نلاحظ ان الحرارة لا تتولد عندما يمر تيار كهربائي في معدن مقاومته صفر ، لذا نستخدم الآن مفرطات التوصلية حين تشكل هذه الخاصية أهمية عظمى ، على سبيل المثال في صنع المغناطيسات الكهربائية الضخمة . إن الأسباب النظرية لظاهرة فرط التوصلية في ضوء التركيب الذري لم تتضح إلا حديثا ، وخاصة بعد 1950 وعلى الرغم من ذلك فإن فهمنا لهذه الظاهرة لا يزال بعيدا عن الكمال .

ومن الطبيعي أنه كلما كبرت مساحة الألواح ، كلما زادت الشحنة عليها . وبالإضافة الى ذلك كلما اقتربت الألواح من بعضها البعض ، فإن اللوح الموجب سيقوم بجذب المزيد من الشحنات السالبة من البطارية نحو اللوح السالب وتتعلق كل هذه العوامل بالتفاصيل التركيبية والهندسية للأداة وتصبح ثوابت خاصة بها ويمكننا على هذا أن نكتب :

الشحنة على المكثف

$$Q = CV$$

حيث C مقدار ثابت لمكثف معين . ويسمى هذا الثابت سعة المكثف عندما تكون السعة كبيرة فإن الشحنات على المكثف تكون كبيرة عند فرق جهد معين بين طرفيه .. لما كانت الشحنة Q تقاس بالكولوم Coulomb وفرق الجهد V بالفولت volt فإن وحدات السعة تصبح كولوم لكل فولت Coulomb/Volt وهذه الوحدة تسمى فاراد Farad (F) .

وإذا كانت أحد اللوحين هي A وكانت المسافة بين اللوحين d

فمن الممكن اثبات أن سعة مكثف متوازي اللوحين تعطى بالمعادلة :

مكثف متوازي اللوحين

١٧ - ٦

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

حيث ϵ_0 (ايسيلون) هي المجاوزية في الفراغ الحر وتساوي $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (الثابت ϵ_0 هو مقلوب 4π مضروبة في الثابت k في قانون كولوم) . كمثال على ماسبق افترض أن اللوحين على شكل مربع طول ضلعه 10cm وأن المسافة بين اللوحين هي 0.10 mm وإذا عبرنا عن وحدات الطول بالأمتار وعوضنا في المعادلة ١٧ - ٦ فإن السعة تكون

$$C = 8.85 \times 10^{-10} \text{ F} = 8.85 \times 10^{-4} \mu\text{F} \quad (١٧ - ك)$$

حيث $1 \mu F$ يساوي $10^{-6} F$ وتستخدم هذه الوحدة لقياس السعات حيث أن قيمها تقع عادة في مدى $1 \mu F$ أو أقل . على أن المعادلات (٥ - ١٧) و (٦ - ١٧) لا بد وأن يستخدم فيها الفاراد F .

من الناحية العملية تحتوي معظم المكثفات ذات الألواح المتوازية على صفحة عازلة من مادة تسمى عازل توضع بين اللوحين . ومرد هذا الى أمرين . أولهما أن الألواح المعدنية يمكن بهذا جعلهما على درجة عالية من القرب بدون أن يتماسا أو يسمحا للشحنات أن تسرى . وكثير من المكثفات المتداولة تجاريا تتركب من صفيحتين معدنيتين رقيقتين وبينهما غشاء رقيق من البلاستيك ليحفظهما من التماس . وتكرر هذه العملية تتكون طبقات من الصفائح المعدنية التي يفصل بين كل اثنين منها طبقة عازلة ، ثم تطوى هذه الصفائح مكونة اسطوانة محكمة تغلف بطريقة ملائمة . وتصبح الأداة في النهاية عبارة عن مكثف متوازي اللوحين على الرغم من أنها تبدو مختلفة تماما عن الأداة المرسومة في الشكل ١٧ - ١٣ . ومكثف قيمته $1 \mu F$ وذو حجم عادى يشغل عادة حوالى 1 cm^3 حين يصنع بالطريقة المشروحة آنفا .

جدول ١٧ - ٢
ثابت العزل عند

2.9	الثلج ($-5^\circ C$)	1.006	هواء
6	ميكا	2.1	بارافين
27	أستون	2.2	زيت البترول
31	كحول ميثيل	2.29	بنزين
81	ماء	2.6	بوليستيرين

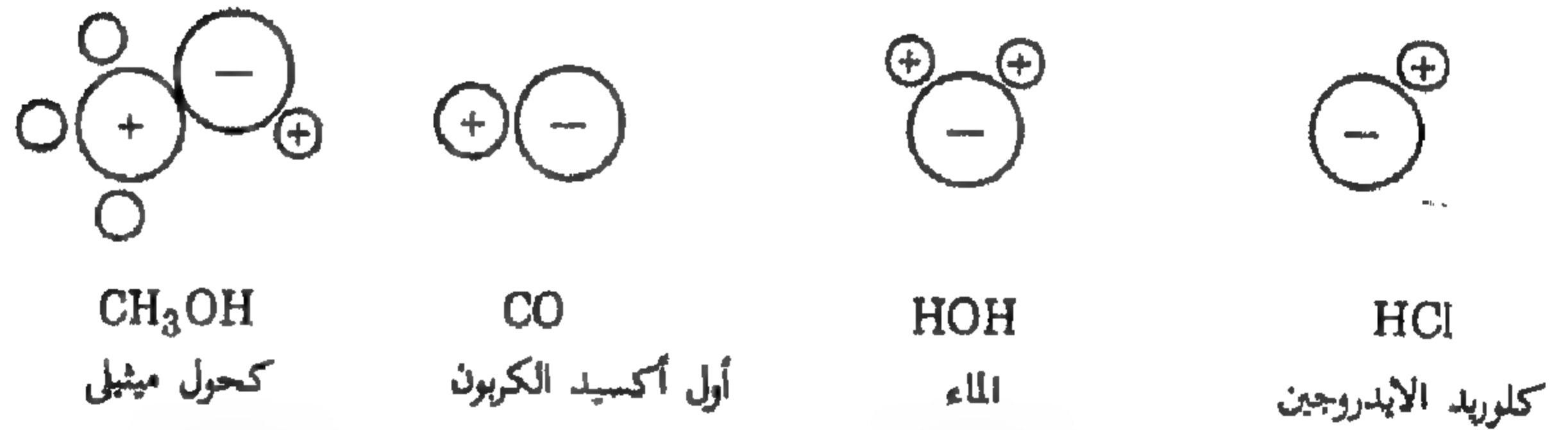
للعوازل قوة عزلية مرتفعة بمعنى أن الشرارة لا تحدث فيها بسهولة كما تحدث في الهواء . ولهذا السبب فإن الألواح المتوازية وبينها عازل يمكن أن تستخدم عند فروق للجهد أعلى من المكثفات الهوائية . اذا كان لدينا مكثف به فراغ (أو هواء بتقريب جيد) بين ألواحها فإن سعته ستعطى بالمعادلة (٦ - ١٧) . أما إذا وضع عازل بين الألواح فإن السعة ستكون أكبر بمعامل قيمته k_d (أى k_d مرة) وهو ثابت العزل أو المجاوزية النسبية للعازل . وبين جدول (١٧ - ٢) بعض القيم النموذجية لثوابت العزل . وسنناقش العوازل بتفصيل أكبر في القسم التالى .

ثابت العزل

تزداد السعة الكهربائية لمكثف متوازي اللوحين إذا وضعت مادة عازلة (عازل) بين اللوحين كما سبق التنويه في القسم السابق . وهذه ذات أهمية في مجالات الفيزياء الحيوية والكيميائية وكذا في المجالات التقنية البحتة . فالتغيرات الحادثة في السعة نتيجة لوضع مادة معينة يمكن أن يستدل منها على السلوك الجزيئي للمادة نفسها ولنحاول أن ن تتوغل في بحث هذه النقطة .

كثير من الجزيئات لا تكون شحناتها موزعة توزيعاً منتظماً . وعلى الرغم من كون الجزيء كوحدة متكاملة متعادل ، إلا أن الذرات المختلفة بداخله يمكن أن تكون قد فقدت (ولو جزئياً) إلكترونات لتكتسبه ذرات أخرى في نفس الجزيء . يوضح الشكل (١٧ - ١٤) تخطيطاً لبعض الأمثلة النموذجية . والجزيئات من هذا النوع تسمى جزيئات ثنائية الاستقطاب حيث أن ثنائى الاستقطاب حسب التعريف عبارة عن شحنتين متساويتين ومتضادتين تفصلهما مسافة صغيرة جداً . أما ما يسمى بعزم ثنائى الاستقطاب μ لمثل هذا الجزيء فيساوى مقدار إحدى الشحنتين مضروباً في المسافة التى تفصلهما . أو $\mu = Qd$

شكل ١٧ - ١٤
أمثلة لجزيئات ثنائية الاستقطاب



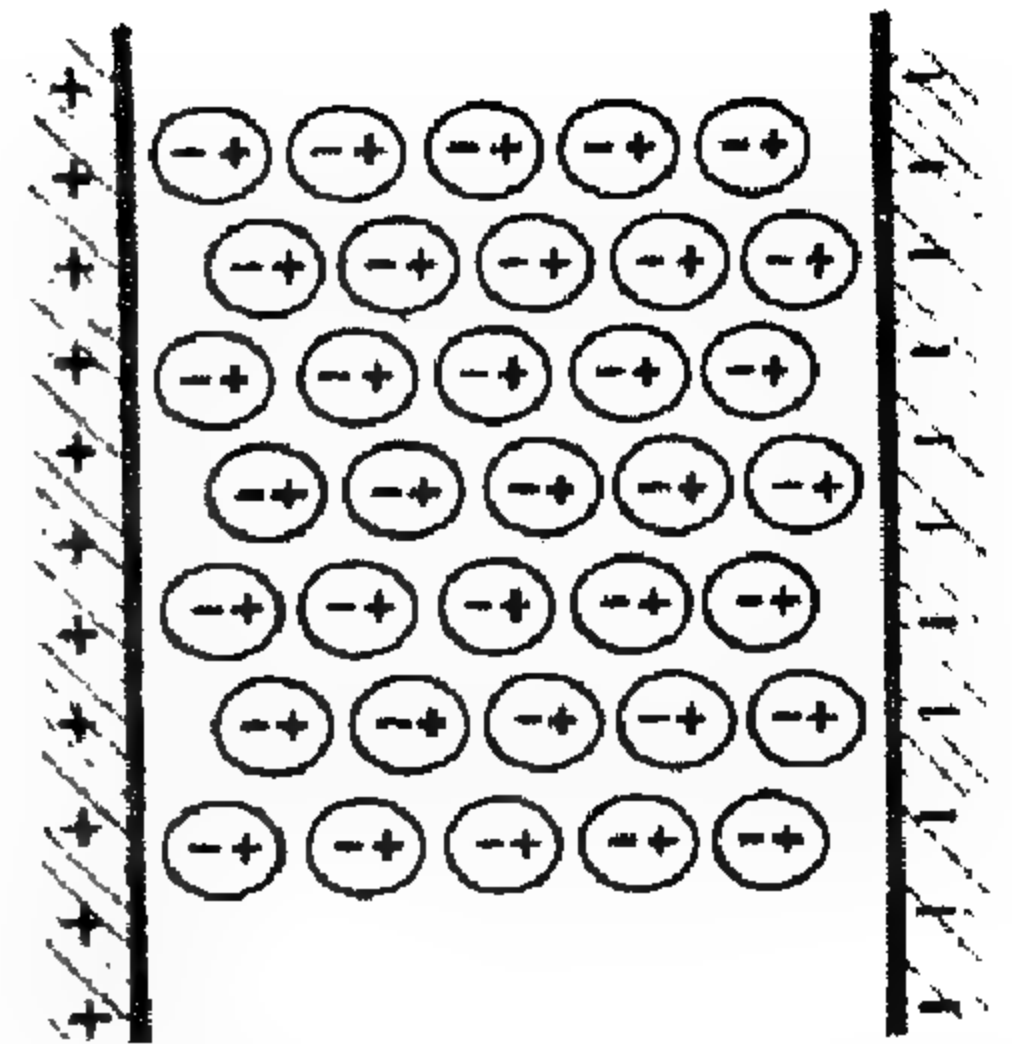
تبلغ قيمة عزم ثنائى الاستقطاب لجزيء نموذجى حوالى* (Debye) 1 D أو مايكافى $1/3 \times 10^{-29} \text{ cm}$ فمثلاً ، إذا كانت الشحنة المنفردة في جزيء HCl في شكل (١٧ - ١٤) هى شحنة الإلكترون $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ وكان عزم ثنائى الاستقطاب لهذا الجزيء هو 1.03 D فإن

$$(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(d) = (1.03)(\frac{1}{3} \times 10^{-29}) \text{ C} \cdot \text{m}$$

حيث d . هى المسافة بين الشحنتين وتساوى $0.5 \times 10^{-10} \text{ m}$ $d \approx$ في كثير من الحالات تكون قيمة d أقل من المسافة المعروفة بين الذرات والسبب في هذا يرجع الى التقسيم غير المتكافىء للشحنات بين الذرات . والقيمة التى أوجدناها للكمية d لجزيء HCl ليست إلا نصف القيمة المعروفة للمسافة بين مراكز الذرات .

*تكرماً للعالم الفيزيائى الكيميائى الشهير ب . دباى P. Debye الذى نال جائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٣٦ لقاء أبحاثه في الجزيئات وأشعة اكس .

افترض أن عازلا يتكون من جزيئات ثنائية الاستقطاب قد وضع بين لوحين مشحونين . يقوم المجال الكهربائي بين اللوحين بلف الجزيئات القطبية بحيث تكون أطرافها السالبة أقرب ماتكون الى اللوح الموجب والعكس بالنسبة لأطرافها الموجبة ، ويوضح الشكل (١٧ - ١٥) هذا بطريقة تخطيطية . من الناحية العملية ، فإن الحركة الحرارية للجزيئات لا تسمح لها بالترتيب بطريقة تقترب من الكمال . ونلاحظ أن الأطراف السالبة للجزيئات قد قامت بخلق شحنات سالبة في الجانب الأيسر للعازل . كما أن شحنات موجبة قد وجدت على الجانب الأيمن المعاكس . ويؤدي هذا الى خفض المجال الكهربائي في داخل المنطقة الموجودة بين اللوحين كما سنرى .

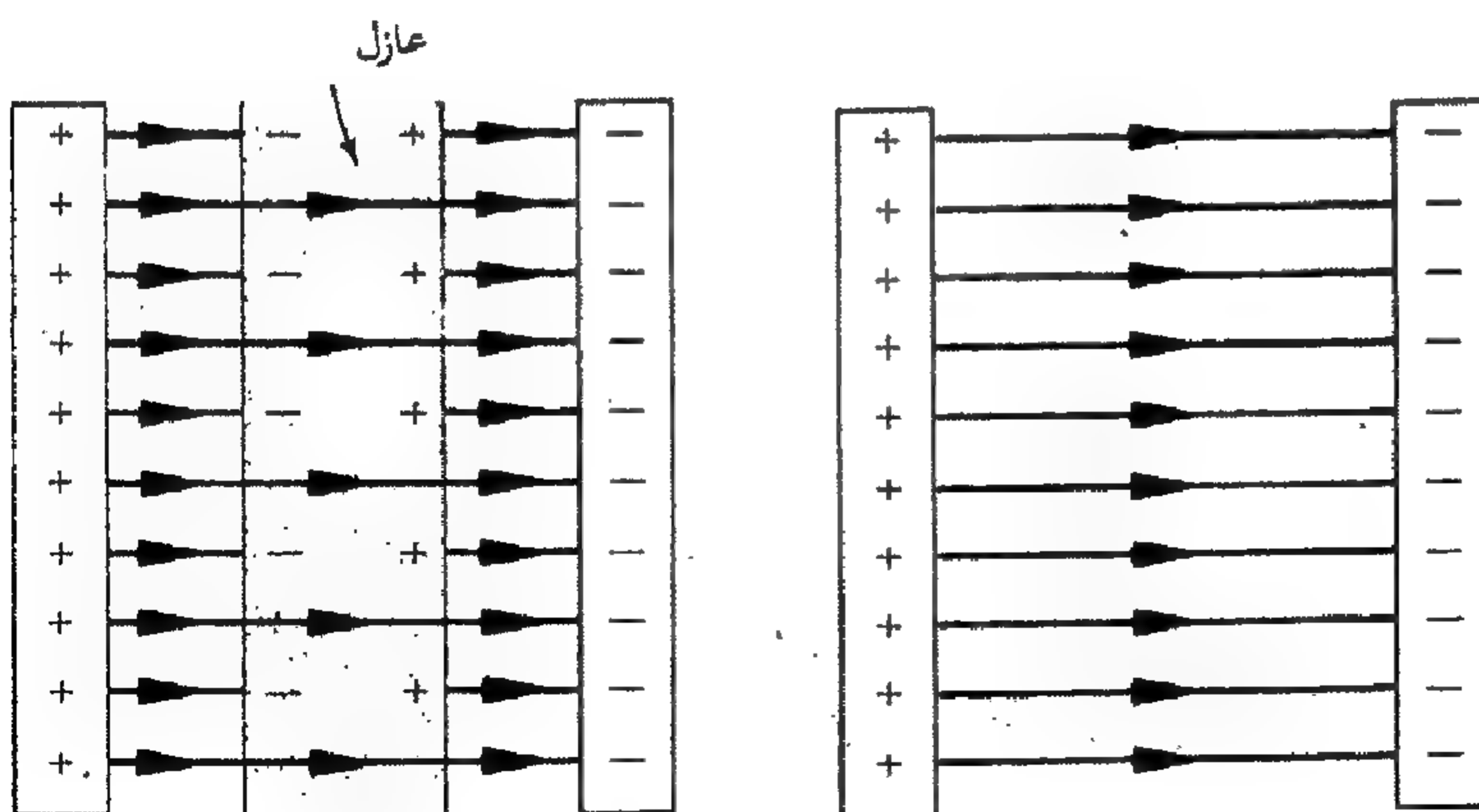


شكل (١٧ - ١٥) عندما يوضع عازل قطبي بين لوحين مشحونين فإن الجزيئات تميل الى الاصطفاف في المجال ، وهي بهذا تجعل مزيدا من الشحنات يسرى الى الألواح . لاحظ أن ترتيب الجزيئات مبالغ فيه في هذا الشكل .

يوضح الشكل (١٧ - ١٦) لوحين معدنيين مشحونين . ولنعتبر ان البطارية التي شحنتهما قد فصلت عن اللوحين حتى أن الشحنات لا تقدر على الحركة من أو الى الألواح . إذا كان المجال الكهربائي بين اللوحين هو E_0 والمسافة بين اللوحين d ، فإن فرق الجهد بين اللوحين يكون ببساطة ، $V_0 = E_0 d$ أما الشحنات Q_0 فوق اللوحين فتعطى بالمعادلة .

$$Q_0 = C_0 V_0 \quad \text{أو} \quad Q_0 = C_0 E_0 d \quad (١٧ - ٧)$$

دعنا نفترض الآن أن صفيحة من عازل قد أدخلت بين اللوحين كما في الشكل (١٧ - ١٦ ب) . على الرغم من افتراضنا أن العازل يملأ الفراغ بين اللوحين تماما إلا أن المسافة التي تركت هي فقط للتوضيح ولتبسيط الوصف لما يجري . نلاحظ أولا أن الشحنة على اللوح المعدني لازالت Q_0 لأن البطارية قد فصلت وليس هناك فيض من الشحنات من أو الى الألواح . (فالعازل لا يوصل) وعلى هذا فالمجال في الفضاء الهوائي بين العازل واللوح لا يزال E_0 . ولكن كما سبق أن أشرنا تتكون طبقة من



$$E_d = E_0 / k_d$$

(ب)

$$d$$

$$V_0 = E_0 d$$

(أ)

شكل (١٧ - ١٦) يقوم العازل بخفض المجال بين الألواح وهو بهذا يخفض فرق الجهد . هل يمكنك تقدير k_d للحالة الموضحة ؟

الشحنات السالبة على سطح العازل حيث تنتهى بعض خطوط المجال الصادرة عن اللوح الموجب . ولكن حيث أن الشحنات المتكونة على العازل أقل من الشحنات الموجودة على اللوح المعدنى ، لذا فبعض الخطوط لن تتوقف هناك بل ستستمر في طريقها خلال العازل . وعليه فإن المجال E_d داخل العازل يكون أقل من E_0 .

إذا كان العازل بملأ تماماً المنطقة بين الألواح المعدنية ، فإن المجال سيكون في كل نقطة مساوياً E_d ويكون فرق الجهد هو $V_d = E_d d$. بالإضافة الى هذا ، إذا كانت سعة المكثف ذى اللوحين المتوازيين هي C_d في حالة وجود العازل بين الألواح فإن ،

$$Q_0 = C_d V_d$$

وذلك لأن الشحنة Q_0 ستظل كما هي ، وبوضع $E_d d$ بدلا من V_d فإن ،

$$Q_0 = C_d E_d d \quad (١٧ - ن)$$

إذا قسمنا هذه العلاقة على المعادلة رقم (١٧ - ٧) وأعدنا ترتيبها فإن ،

$$C_d = (C_0) \left(\frac{E_0}{E_d} \right) \quad (١٧ - ٨)$$

أو بكلمات أخرى ، تزداد السعة الكهربائية متناسبة في ذلك مع النسبة بين المجال الكهربائى الأصيل والمجال الكهربائى داخل العازل .

سنذكر أن ثابت العزل k_d لمادة عازلة قد عرف على أنه يساوى النسبة C_d/C_0 ومن المعادلة (١٧ - ٨) يعنى هذا أن المواد التى لها ثابت عزل كبير هى التى تخفض بشدة وكفاءة من المجال الكهربائى بين الألواح . أو أن المادة ذات ثابت العزل الكبير هى تلك المادة التى تتكون الشحنات بسهولة على سطحها . كقاعدة عامة ، فإن الجزيئات التى لها أكبر عزم لثنائى الاستقطاب سيكون لها بالتالى أكبر ثابت عزل ، حيث أن طبقة الشحنات المتكونة ستكون أكبر مايمكن . على أن الماء والكحول الميثيل يعتبران استثناء لهذه القاعدة ، ففيهما ترتبط الجزيئات معا على شكل « مجموعات » بواسطة مايسمى بأربطة الهيدروجين . وتتصرف هذه « المجموعات » الجزيئية كما لو كانت جزيئات لها عزم ضخم لثنائى الاستقطاب معطية بذلك ثابتا كبيرا للعزل كما هو مدرج بالجدول (١٧ - ٢٠) . وحتى الجزيئات التى ليست ثنائية الاستقطاب مثل البنزين ، والميثان ، الخ ، لها تأثيرات عزلية ملحوظة .

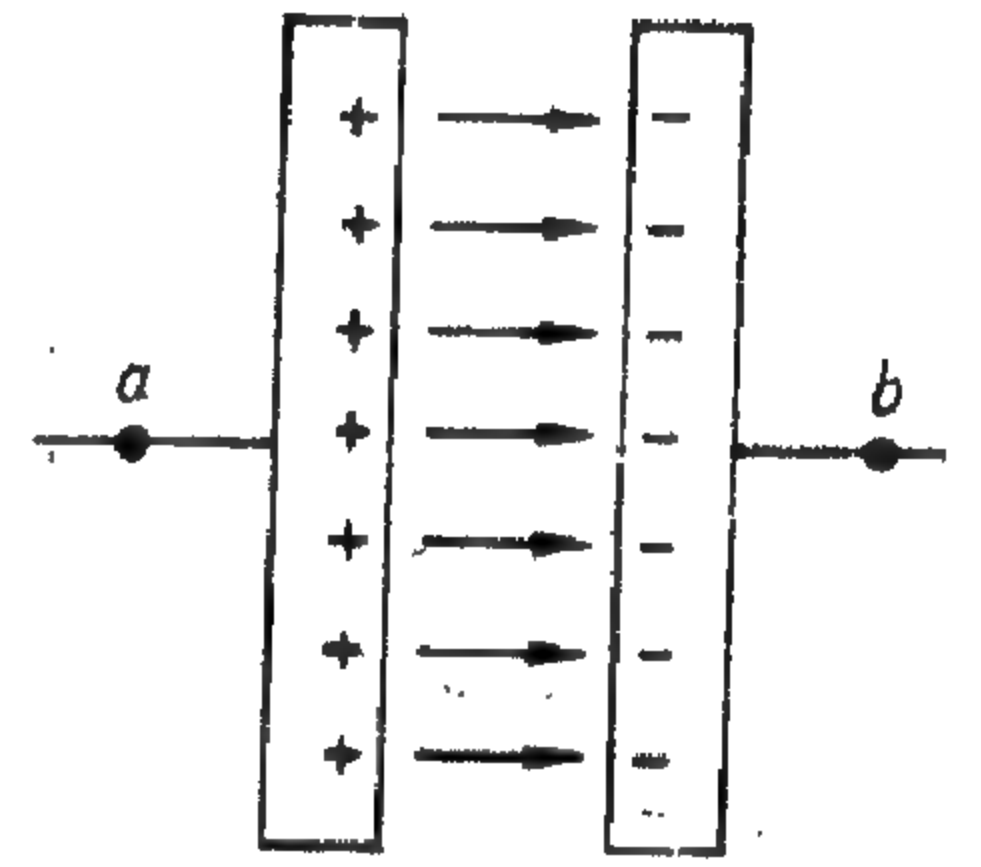
وتصبح هذه الجزيئات ثنائية الاستقطاب بواسطة القوى المشوهة للمجال الكهربائى الذى توضع فيه هذه الجزيئات .

اثر العازل على القوى

نعتبر ثوابت العزل للسوائل على درجة قصوى من الأهمية في كثير من التفاعلات الحيوية والكيميائية ، نظرا لأن العوازل السائلة تغير القوى الموجودة بين الأيونات تغيرا عظيما ، وكما رأينا فالمجال الكهربائي بداخل العازل الموجود بين لوحى مكثف ليس الا $1/k_d$ من قيمته لو أن العازل لم يكن موجودا . وهذه العلاقة نفسها قائمة في كثير من الحالات المعقدة . فإذا أثر أيونان كل على الآخر بقوة معينة وهما في محلول ما ، فإن هذه القوة تتضاءل بمقدار $1/k_d$ إذا ما وجد أحد المذيبات . ولما كان ثابت العزل للماء 80 ، فالقوى الموجودة بين الأيونات وهى في الماء ليست إلا $1/80$ من قيمتها لو لم يكن الماء موجودا . ونتيجة لهذا كان من السهل على الأيونين Na^+ و Cl^- أن ينفصلا في الماء إذا ما أذيب فيه NaCl نتيجة للحركة الحرارية البسيطة . على أنه في البنزين تكون $1/k_d = 1/2.3$ أى أن القوى بين الأيونات تظل أكبر من أن تحطمها الحركة الحرارية ، أى أن البنزين لا يذيب NaCl . وكثيرا من المحاليل المشابهة توجد في الأنظمة الكيميائية والحيوية ، حيث تقوم الطبيعة العزلية للمذيب بدور العامل المتحكم .

١٧ - ١١ الطاقة المختزنة في مكثف

افترض أن المكثف المشحون في شكل (١٧ - ١٧) قد تم تفريغه عن طريق توصيل سلك من نقطة a الى نقطة b فإذا كان هذا السلك دقيقا بدرجة كافية فإنه خلال حركة الشحنات السالبة من اللوح السالب الى اللوح الموجب حيث تتعادل ، يصبح السلك ساخنا . وحيث أن الحرارة طاقة ، لذا فالمكثف المشحون ، والذي سبب ظهور الطاقة الحرارية ، يجب أن يكون قد اختزن قدرا من الطاقة بداخله وسنحاول حساب كمية الطاقة هذه .



شكل ١٧ - ١٧

الطاقة المختزنة في مكثف
تساوى الشغل المبذول في
شحنة Q ، V'

لنعتبر أولا كمية الشغل المطلوبة لشحن هذا المكثف . وهذا الشغل سيكون هو نفسه كمية الطاقة المختزنة داخل المكثف . حين لا يكون المكثف مشحونا ، لا تلزم أية كمية من الشغل لحمل شحنة موجبة صغيرة من اللوح b الى اللوح a ولكن كلما استمررنا في حمل الشحنات ازداد المجال بين اللوحين وأصبح محسوسا بحيث أنه يتحتم جذب الشحنات بقوة . وفي الحقيقة فإنه بشحن المكثف الى القدر الذى يصبح فيه فرق الجهد بين اللوحين هو V' فولت ، فإن الشغل المطلوب لحمل كمية صغيرة من الشحنة Q سيصبح QV'

من الواضح ان أول شحنة حملت لم تتطلب شغلا لأن فرق الجهد V' كان صفرا . ولكن الدفعة الأخيرة من الشحنة حملت خلال فرق للجهد مقداره V عبر طرفي المكثف من لوح الى آخر ، وبمكتنا باستخدام القوانين الرياضية إيجاد الشغل الكلى بسهولة . على أنه قد يكون من المنطقي أن نعتبر الشغل الكلى مكافئا للشغل اللازم

بذله لحمل الشحنة الكلية Q عبر فرق الجهد المتوسط خلال عملية الشحن ، وهو $\frac{1}{2}V$ وقد أمكن التحقق من صحة هذا الافتراض . وعلى هذا تكون الطاقة المخزنة في مكثف ذى شحنة Q وفرق للجهد مقداره V هي

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}QV \quad (17 - 9) \quad \text{طاقة المكثف}$$

باستخدام العلاقة $Q = CV$ فإن المعادلة (17 - 8) يمكن كتابتها بصورة أخرى

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{Q^2}{2C}$$

مثال توضيحي 17 - 7 : مكثف قيمته $2\mu F$ شحن من بطارية قوتها $12V$ ماهي الطاقة المخزنة في المكثف ؟
طريقة الحل : لدينا

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}(2 \times 10^{-6})(144) = 1.44 \times 10^{-4} J$$

يجب على الطالب أن يتحقق من أن الوحدات المستخدمة في هذه المعادلة تحقق الوحدات الناتجة ، وهنا يجب ملاحظة أنه من المعادلة $Q = CV$ أن $1F$ تكافئ $1C/V$

17 - 12 الطاقة المخزنة في مجال كهربائي

رأينا في القسم السابق أن الطاقة المخزنة في مكثف مشحون هي $\frac{1}{2}CV^2$ حيث V هو فرق الجهد عبر المكثف ذى السعة C ... على الرغم من أنه ليس من الضروري النص بدقة على كيف أو أين تم تخزين هذه الطاقة ، إلا أنه يكون من الملائم أحيانا أن نفكر في الطاقة على أنها قد اختزنت في المجال الكهربائي بين ألواح المكثف . وبأخذ هذا في الاعتبار فإنه من المستحسن التعبير عن الطاقة المخزنة بدلالة المجال الكهربائي E بين ألواح المكثف . ويمكننا عمل هذا اذا تذكرنا أنه للمكثف متوازي اللوحين تكون $V = Ed$ حيث d هي المسافة بين اللوحين .

وعلى هذا تكون الطاقة المخزنة في مكثف متوازي اللوحين هي

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}CE^2d^2$$

ولكن المعادلة (17 - 6) تعطينا قيمة السعة لمكثف متوازي اللوحين بدلالة المساحة للوح على أنها :

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

شكل (15 - 11)
تحدث الضربات عند اهتزاز
مصدرين متشابهين بتردد
مختلفين اختلافا صغيرا .

بحيث يكون المكثف محتويا على فراغ بين لوحيه ، أما إذا كان هناك عازل بين الألواح ولكن ثابت العزل هو k_d فإن

$$C = \frac{k_d \epsilon_0 A}{d}$$

بالتعويض عن قيمة C في معادلة الطاقة فإن

$$\text{الطاقة} = (\frac{1}{2} \epsilon_0 k_d E^2)(Ad)$$

ولكن Ad هو حجم الفضاء بين ألواح المكثف أو الحجم الذى يوجد فيه مجال كهربائى ثابت E بقسمة كلا الجانبين على الحجم نحصل على معادلة للطاقة لوحدة الحجم ، أى الطاقة التى تتصورها مخزنة في وحدة الحجم من الفضاء الذى يكون فيه المجال الكهربائى هو E . لدينا :

$$\text{الطاقة لوحدة الحجم} = \frac{1}{2} \epsilon_0 k_d E^2 \quad (17 - 10)$$

نلاحظ أن الطاقة المخزنة في وحدة الحجم تتناسب مع مربع شدة المجال الكهربائى . ومن المناسب دائما استخدام المعادلة (17 - 10) كوسيلة لربط الطاقة بمجال كهربائى معين . وعلى الرغم من أن المعادلة قد اشتقت لحالة خاصة جداً ، إلا أنه في كتب أكثر تقدما يوجد اثبات أن هذه المعادلة صالحة بشكل عام .

ملخص

تعمل البطاريات كمصادر للطاقة في الدوائر الكهربائية ، فهي توفر فرقا للجهد تنحدر فيه الشحنات . وفرق الجهد بين طرفى بطارية معزولة كهربائيا يسمى القوة الدافعة الكهربائية لهذه البطارية (E)

حينما تنحدر شحنة q خلال فرق للجهد V فإنها تكتسب طاقة قدرها qV . والشحنات الموجبة اذا تركت طليقة فإنها تنحدر من الجهد العالى الى الجهد المنخفض بينما تنحدر الشحنات السالبة فى الاتجاه المضاد .

يعرف التيار الكهربائى على أنه يأخذ اتجاه سريان الشحنات الموجبة ، فإذا كان لدينا فيض من الشحنات السالبة المتحركة فإن التيار الناشئ . يعرف بأنه سريان فى الاتجاه المضاد . لو أن شحنة ΔQ تسرى عبر نقطة معينة فى زمن Δt فإن التيار I يعطى بالمعادلة $I = \Delta Q / \Delta t$ أما وحدات التيار فهى الأمبير (A)

عندما يوجد فرق للجهد V بين طرفى مقاوم ، فإن التيار خلال هذا المقاوم يرتبط مع V بالمعادلة $V = IR$ والكمية R هى مقاومة المقاوم وتقاس بالأوم (Ω) . ولا ينص قانون أوم على أن $V = IR$ فقط ، بل ينطوى على أن المقاومة R مقدار ثابت ، لا يعتمد على V أو I ويسرى التيار خلال مقاوم مامن طرفه ذى الجهد العالى الى طرفه ذى الجهد المنخفض .

يقوم الأميتر بقياس التيار الذى يسرى خلاله ، والإميتر الجيد له مقاومة صغيرة جدا . أما الفولتيومتر فيقيس فرق الجهد بين طرفيه ويجب أن تكون مقاومته عالية جدا .

تقيس مقاومة مادة ما ρ مقاومة هذه المادة لسريان الشحنات ويمكن بدلالة هذه الكمية التعبير عن مقاومة سلك ماطوله L ومساحة مقطعة A بالمعادلة الآتية

$$R = \rho (L/A).$$

تتغير مقاومة معظم المواد مع درجة الحرارة ، فلو كانت α_{20} ، هي معامل تغير المقاومة مع درجة الحرارة باعتبار درجة 20° كمرجع فإن

$$\frac{R - R_{20}}{R_{20}} = \alpha_{20}(t - 20^\circ)$$

حيث R هي المقاومة عن درجة حرارة 1°C ، R_{20} هي المقاومة عند 20°C . وهناك علاقة مماثلة لهذه مع استبدال ρ مكان R .

يعتبر المكثف أداة لتخزين الشحنة ، فهو يحمل شحنات متساوية ومتضادة على لوحيه . لو أن فرقاً للجهد مقداره V قد أوجد شحنات Q على ألواح المكثف عندما يوجد بين طرفيه ، فإن السعة C تعطى بالمعادلة $C = Q/V$ ووحداتها هي الفاراد (F) . وسعة مكثف متوازي اللوحين عندما تكون مساحة اللوح هي A والمسافة بين اللوحين d هي $C = \epsilon_0 A/d$ حيث ϵ_0 هي مجاوزة الفراغ الحر وتساوي $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

تقوم العوازل عادة بخفض المجال الكهربائي الذي توضع به . والمكثف متوازي اللوحين ذو شحنة Q سيكون المجال بين لوحيه أقل بما قيمته $1/k_d$ عندما يملأ الفراغ بين اللوحين بواسطة عازل ما . والكمية k_d تسمى ثابت العزل لذلك العازل وهي تساوي 80 تقريباً . بالنسبة للماء وتتراوح بين 592 لمعظم الزيوت والمواد المشابهة أما في الفراغ فإن $k_d = 1$.

يخزن المكثف المشحون طاقة مقدارها $\frac{1}{2} QV$ كما أن الطاقة يمكن اعتبارها مخزنة في المجال الكهربائي . إذا كان هناك عازل ثابتة k_d وكان المجال الكهربائي هو E فإن الطاقة المخزنة لوحدة الحجم هي $\frac{1}{2} \epsilon_0 k_d E^2$

الحد الأدنى من الاهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادراً على عمل الآتي :

- ١ - أن تذكر الغرض من البطارية في دائرة بسيطة ، وأن تشرح ما المقصود بالقوة الدافعة الكهربائية لها (ق د ك)
- ٢ - أن توجد التغير في طاقة الحركة لشحنة موجبه او سالبة معروفين اذا تحركت خلال فرق معلوم للجهد ، واذا ما عرفت السرعة الابتدائية فإنك تستطيع إيجاد السرعة النهائية (مع اهمال أية تأثيرات نتيجة النسبية) .
- ٣ - أن تصف مدفعاً الكترونياً بسيطاً .
- ٤ - أن تذكر التغير في الطاقة مقدراً بوحدات الالكترون - فولت لشحنة q حين تنحدر في فرق معلوم للجهد وأن تحول الطاقة من الكترون فولت الى جول (J) والعكس بالعكس .
- ٥ - أن تفيد من العلاقة $I = \Delta Q / \Delta t$ في مواقف بسيطة وأن تعرف التيار بكلمات بسيطة من تعبيرك .
- ٦ - أن تفسر ربما لدائرة بسيطة كذلك الذي في الشكل ١٧ - ٨ وأن تذكر فرق الجهد بين أى زوج من النقط في الدائرة .
- ٧ - أن تذكر أى أطراف المقاوم عند الجهد الأعلى عندما يكون اتجاه سريان التيار خلال المقاوم معلوماً .
- ٨ - أن تذكر شكل المعادلة التي تعبر عن قانون أوم وأن تشرح معناها وأن تستخدم المعادلة في تعريف المقاومة ووحداتها .
- ٩ - أن توضح كيفية توصيل الاميتر - في دائرة معطاه - لقياس التيار في سلك معين .
- ١٠ - أن توضح كيفية توصيل الفولتميتر - في دائرة معطاه - لقياس فرق الجهد بين نقطتين في الدائرة .
- ١١ - أن تحسب قيمة المقاومة لقطعة معينة من السلك ، اذا علمت مقاومة مادة السلك
- ١٢ - أن توجد مقاومة سلك ما عند درجة حرارة معينة اذا علمت قيمة المقاومة ومعامل تغيرها مع درجة الحرارة عند درجة حرارة مرجعية .
- ١٣ - أن ترسم مكثفاً متوازي اللوحين وتوجد العلاقة بين C ، Q ، V لهذا المكثف وأن تذكر وحدات C .
- ١٤ - أن تحدد طريقة يمكنك بها تعيين ثابت العزل لسائل ما . اذا ما أتيج لك جهاز لقياس السعة .
- ١٥ - أن تحسب الطاقة المخزنة في مكثف ما حينما يشحن حتى فرق معلوم للجهد .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من
ق . د . ك .

ان الشحنات الموجبة تنحدر من + الى - بينما تفعل الشحنات السالبة العكس .

الالكترون - فولت

$I = \Delta Q / \Delta t$ ، الأمبير

قانون أوم ، $V = IR$

المقاومية ، $\rho = RA/L$

$$(R - R_{20})/R_{20} = \alpha_{20}(t - 20^\circ)$$

$Q = CV$ ، الفاراد

ثابت العزل k_d

الطاقة $\frac{1}{2}QV$

أسئلة وتخمينات

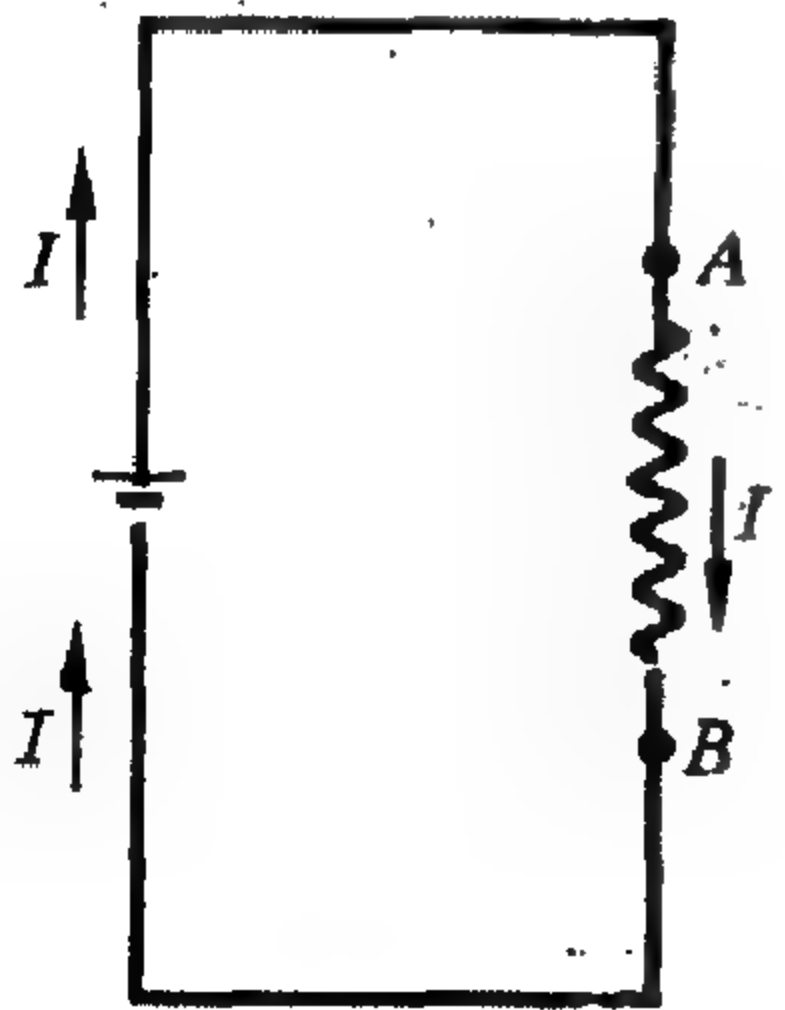
١ - يصر بعض الطلاب أحيانا على أن التيار « يستهلك » كلما مر في مقاوم . إذا أخذنا مثالا من الماء فكيف يمكنك اقناع الطالب أن التيار لا يفقد في المقاوم ؟

٢ - كيف يمكن معرفة أى أطراف البطارية عند الجهد العالى أى موجب حسب الرسم التخطيطى للدائرة ؟ للمقاوم ؟

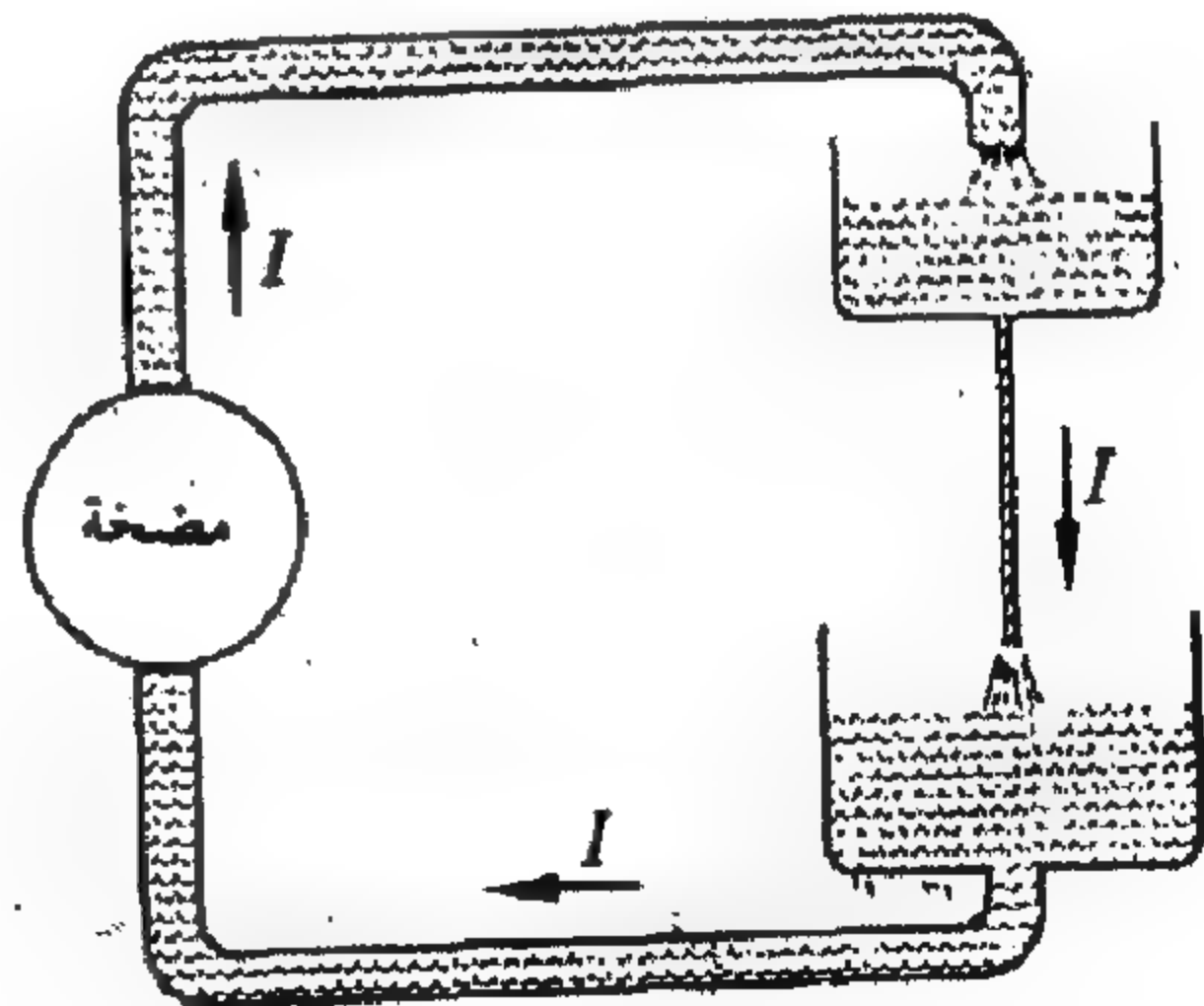
٣ - لا يفقد تيار أو فرق جهد أبدا في دائرة . ما الذى يفقد إذن عندما يسرى التيار في الدائرة ؟

٤ - تعتبر مصابيح الإضاءة الفلورية عادة ، أكثر كفاءة في انبعاث الضوء من المصابيح المتوهجة ، بمعنى أنه بنفس الطاقة المستخدمة يقوم المصباح الفلورى باعطاء ضوء أكثر من المصباح المتوهج . المس كلا المصباحين بعد أن يكونا قد اشتعلا لعدة دقائق . اشرح لماذا كان المصباح المتوهج أقل كفاءة كباعث للضوء .

٥ - في الشكل م (١٧ - أ) أ تقوم المضخة برفع الماء الى المستودع الأعلى بحيث يظل مستوى الماء ثابتا . ينساب الماء ببطء من الانبوبة الضيقة ليصب في المستودع الأسفل . أشر الى أوجه الشبه بين هذه الدائرة المائية والدائرة الكهربائية في الجزء (ب)



(ب)



(أ)

شكل (م ١٧ - ١)

- ٦ - شحن مكثف متوازي اللوحين بشحنة ثابتة Q (فصلت البطارية بحيث أن الشحنات لا تستطيع أن تتحرك منها أو إليها) سحب اللوحان بعيدا عن بعضهما الى حد ما . يقوم من يسحب اللوحين بعمل شغل في هذه العملية . لماذا ؟ هل يتغير فرق الجهد بين اللوحين خلال هذه العملية ؟ ماذا يحدث للشغل المبذول بواسطة الساحب .
- ٧ - هناك قدر كبير من الشبه بين الشرارة التي تحدث في مكثف هوائي ومضة البرق خلال عاصفة رعدية . اشرح كيفية هذا التشابه .
- ٨ - اشرح لماذا يجب أن تكون مقاومة الأميتر صغيرة . ماهي الاحتياطات الواجبة في تناول الأميتر ؟
- ٩ - لماذا يجب أن تكون للفولتميتر مقاومة كبيرة ؟
- ١٠ - اذا وضع لوح من المعدن بين لوحى مكثف بدون أن يمسهما ، هل سيكون ذا ثابت عزل كبير أم صغير ؟ اشرح .
- ١١ - حين ينقذف الشعاع الالكترونى عبر طول أنبوبة التليفزيون ، ماهى - بالتقريب - المسافة التى ستهبطها الالكترونات تحت تأثير الجاذبية الارضية ؟ هل يمكن لجهاز التليفزيون أن يعمل اذا وضع على ظهره بحيث ينقذف شعاع الالكترونات الى أعلى ؟
- ١٢ - استعمل اوميتر (هو أساسا بطارية متصلة على التوالي مع جهاز قياس حساس جدا) لقياس مقاومتك من يد لآخرى . هناك تيار يبلغ حوالى $0.03A$ وهو كاف اذا مر خلال الجزء الأوسط من جذع الانسان أن يحدث شللا في الجهاز التنفسى . ماهو فرق الجهد اللازم لصعقتك اذا وضع بين يديك ؟

مسائل

- ١ - ينحدر الكترون من السكون ($m = 9.1 \times 10^{-31} \text{Kg}, q = -e$) مبتدأ من فتيلة سالبة الى لوح موجب داخل أنبوبة تفريغ ، وقد وصل طرفا بطارية قوتها $12.0V$ الى اللوح والفتيلة .
- (أ) ماهى سرعة الالكترون قبل اصطدامه باللوح مباشرة ؟ (ب) و ماهى طاقة حركته مقدرة بالالكترون فولت في تلك اللحظة ؟
- ٢ - ايراد تعجيل بروتون من السكون وحتى سرعة مقدارها $5.0 \times 10^6 \text{m/s}$ (أ) ماهى قيمة فرق الجهد الذى يجب أن ينحدر فيه البروتون ؟ (ب) كم ستكون طاقة حركة البروتون بالالكترون فولت ؟ ($m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{Kg}, q = e$)
- ٣ - قذف بروتون بطاقة حركة مقدارها 5000eV من لوح سالب تجاه لوح موجب وكان فرق الجهد بين اللوحين 1500V (أ) مامقدار طاقة الحركة (بالالكترون فولت) التى سيفقدتها البروتون حين تصطدم باللوح الموجب ؟
- كم ستكون طاقة حركته (بالالكترون فولت) قبل اصطدامه باللوح مباشرة ؟ (ح) أعد الحل بالنسبة لجسيم الفا α (شحنة جسيم الفا وهو عبارة عن نواة هليوم هى $q = +2e$)
- ٤ - عجل الكترون يتحرك بسرعة مقدارها $5 \times 10^6 \text{m/s}$ خلال فرق للجهد مقداره $20V$ ماهى سرعته الجديدة ؟
- ٥ - سحب تيار مقداره $2.0A$ من بطارية ٦ - فولت لمدة 20min (أ) ماهى الشحنة وكم من الالكترونات تخرج من البطارية في هذه الفترة الزمنية ؟
- ٦ - تقوم آلة لقذف الذرات بانتاج تيار قدره 0.0010A (١ مللى امبير $1 \text{mA} = 0.001 \text{A}$) خلال فرق للجهد مقداره 1MV (أ) مامقدار الشحنة التى تنتجها في زمن قدره h (ب) اذا كان التيار مكونا من فيض من البروتونات فكم عدد البروتونات المنتجة في نصف ساعة ($\frac{1}{2} h$) ؟
- ٧ - يسحب مصباح إنارة عادى ، شدته $60W$ تيارا قدره $0.5A$ حين يكون فرق الجهد بين طرفيه $120V$. ماهى مقاومة المصباح ؟
- ٨ - كم من التيار يسرى من بطارية 12V حين يتصل بين طرفيها مقاوم قيمته 3.0Ω
- ٩ - سلك من النحاس رقم 10 قطره 2.59mm . القيمة التقريبية للتيار الآمن الذى يمر في مثل هذا النوع من السلك هى $30A$ (اذا زاد التيار عن هذا ، يصبح السلك ساخنا جدا) . (أ) اوجد مقاومة قطعة من هذا السلك طولها $5.0m$ عند درجة حرارة $20^\circ C$ (ب) ماهو فرق الجهد الذى سيتكون بين طرفى هذه القطعة من السلك حين تحمل تيارا قدره $30A$ ؟
- ١٠ - فى مصباح إنارة عادى كان طول الفتيلة 8cm وقطرها 0.150mm . حين يوصل المصباح عبر 120V فان الفتيلة تصبح محماة لدرجة الابيضاض ويقوم المصباح بسحب تيار مقداره $0.25A$ (أ) ماهى مقاومة المصباح تحت هذه الظروف ؟ (ب) ماهى مقاومة مادة الفتيلة عند درجة الحرارة هذه ؟

١١ - مصباح عادى ذو فتيلة من التنجستن شدته $60W$ مقاومته 240Ω حين يكون مضاءً . تبلغ درجة حرارة الفتيلة $2000^\circ C$ تقريبا تحت هذه الظروف . اذا اعتبرنا قيمة α فى الجدول (١٧ - ١) صالحة حتى هذه الدرجات العالية للحرارة ، فما هى مقاومة المصباح عند $20^\circ C$ ؟

١٢ - تبلغ مقاومة مصباح خاص ذى فتيلة من التنجستن 30Ω عند درجة حرارة $20^\circ C$. حين يضاء المصباح تبلغ مقاومته 240Ω كم تبلغ درجة حرارة الفتيلة الساخنة بالتقريب ؟

١٣ - * يتصل مقاوم من الجرافيت على التوالى مع مقاوم حديدى مقداره $10-\Omega$ (عند $20^\circ C$) كم يجب أن تكون قيمة مقاوم الجرافيت حتى تكون مقاومة المجموعة غير معتمدة على درجة الحرارة ؟

١٤ - ** يراد صنع مقاوم $100-\Omega$ يكون غير معتمد على درجة الحرارة وذلك باستخدام مقاوم من الكربون متصل على التوالى مع مقاوم الحديد . كم يجب أن تكون مقاومة كل منهما عند $20^\circ C$ ؟

١٥ - مكثف نموذجى يستخدم فى الراديو تبلغ سعته $2.0 \times 10^{-8} F$ ما مقدار الشحنة الموجودة على هذا المكثف حين يتصل عبر به $9.0-V$

١٦ - وضع لوحان متماثلان من المعدن متوازيين أمام أحدهما الآخر وكانت المسافة بينهما $0.50 mm$ ومساحة وجه كل منهما $10 cm^2$. (أ) اوجد سعة الالواح حين يكون بينهما هواء . (ب) اذا وصل هذا المكثف ببطارية $12 V$ فككم من الشحنة ستكون على المكثف ؟ (ج) أعد أ (وب) اذا كان الفراغ بين اللوحين مملوء بمادة البولستيرين .

١٧ - مكثف ماسعته $1.750 \times 10^{-9} F$ حين يكون الحيز بين الواحة مملوء بالهواء كم تبلغ سعته اذا ملئ هذا الحيز بالأسيتون ؟

١٨ - كم من الطاقة يخزن فى مكثف سعته $2-\mu F$ حين يشحن الى فرق جهد مقداره $300 V$ ؟

١٩ - * مكثف متوازي اللوحين يمكن ضبط المسافة بين لوحيه دون الانحلال بياق الدائرة الكهربائية . كانت السعة فى الوضع A هي $3.0 \times 10^{-9} F$ وفى الوضع B هي $2.7 \times 10^{-9} F$ شحن المكثف وهو فى الوضع A من بطارية $12 V$ ثم فصلت البطارية وغير (أ) المكثف الى B بدون تغيير الشحنات التى على ألواح . (أ) ماهى الشحنة الموجودة على المكثف ؟ ، (ب) ماهو فرق الجهد عبر المكثف ؟ ، (ج) بكم تتغير الطاقة المخزنة فيه حين يتحول من الوضع A الى الوضع B ؟ (د) ماهو الحد الأدنى من الشغل الذى نحتاجه ، بذله لتحويل المكثف من الوضع A الى B ؟

الفصل الثامن عشر

دوائر التيار المستمر

درسنا في الفصل السابق بعض عناصر الدائرة الكهربائية المختلفة مثل البطاريات والمقاومات . وهذه العناصر تتصل معا بطرق عديدة لتكون دوائر كهربائية عملية . سنقوم في هذا الفصل بتحليل مثل هذه الدوائر وسنجد أن هناك قاعدتين بسيطتين تدعيان قاعدتا كيرتشوف وتتيحان أساسا منظما لتحليل الدوائر . سنتعلم في هذا الفصل أيضا بعض الشيء عن القدرة الكهربائية والأفكار الأساسية للأمان الكهربائي .

١٨ - ١ قاعدة النقطة لكيرتشف

هناك قاعدتان أساسيتان تنطبقان على جميع الدوائر الكهربائية . ومن السهل فهم هاتين القاعدتين وحفظهما لأنهما تكادان تكونان بديهيتين . ولمعرفة ما تنطوي عليه القاعدة الأولى لنرجع الى الشكل (١٨ - ١)

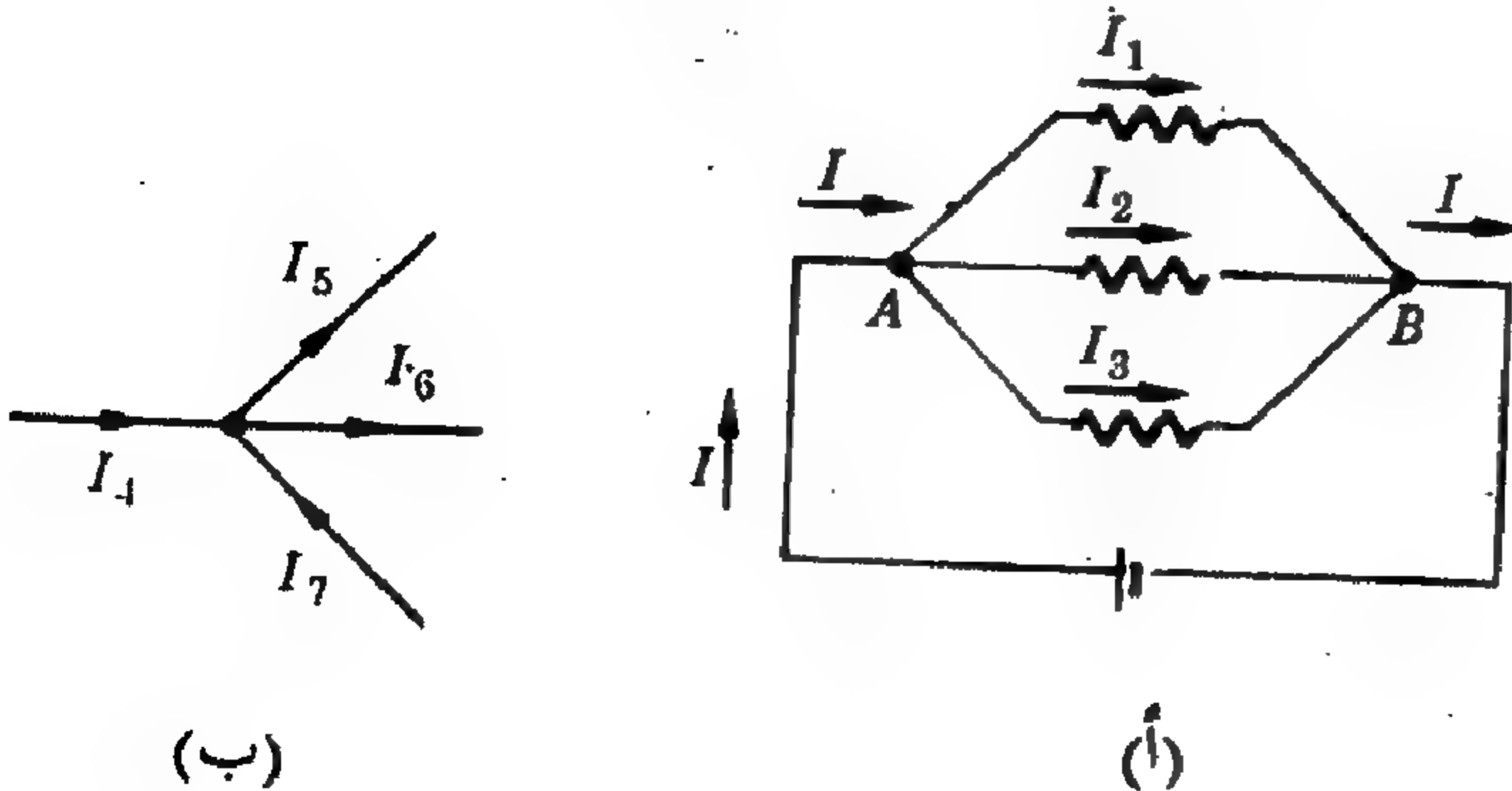
في الجزء (أ) نرى موقفا معينا حيث تلتقى مجموعة من الأسلاك عند نقطة اتصال . ولنعتبر النقطة A . التيار الذي يسرى في هذه النقطة هو I والتيارات الخارجة منها هي I_1 ، I_2 ، I_3 . ماذا عن هذه التيارات ؟ يمكن الاجابة عن هذا السؤال بسهولة لو عقدنا مقارنة مع أنابيب المياه . الكمية I قد تمثل تيارا يبلغ عدة سنتيمترات مكعبة من المياه تندفع الى النقطة A كل ثانية فاذا لم يكن هناك تسرب بالانابيب ، فان نفس كمية المياه بالضبط سوف تخرج من النقطة A كل ثانية . بطريقة أخرى ، لما كانت النقطة A لا يمكنها تخزين المياه فهي تصرف من المياه بقدر ما يندفع اليها . اذا عبرنا بالمعادلات فانه في هذه الحالة ، التيار الداخل الى A = التيار الخارج من A وتصبح

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

الموقف بالنسبة للشحنات مشابه لهذا الموقف . فالتيار الذي ينفد الى النقطة A يجب أن يساوي التيار الذي يفيض خارجا من النقطة A . وفي هذه الحالة أيضا يكون $I = I_1 + I_2 + I_3$. بالاضافة الى هذا فان هذه القاعدة يجب أن تنطبق على أية نقطة أخرى في الدائرة . فعند النقطة B على سبيل المثال التيار الداخل الى B = التيار الخارج من B وتصبح

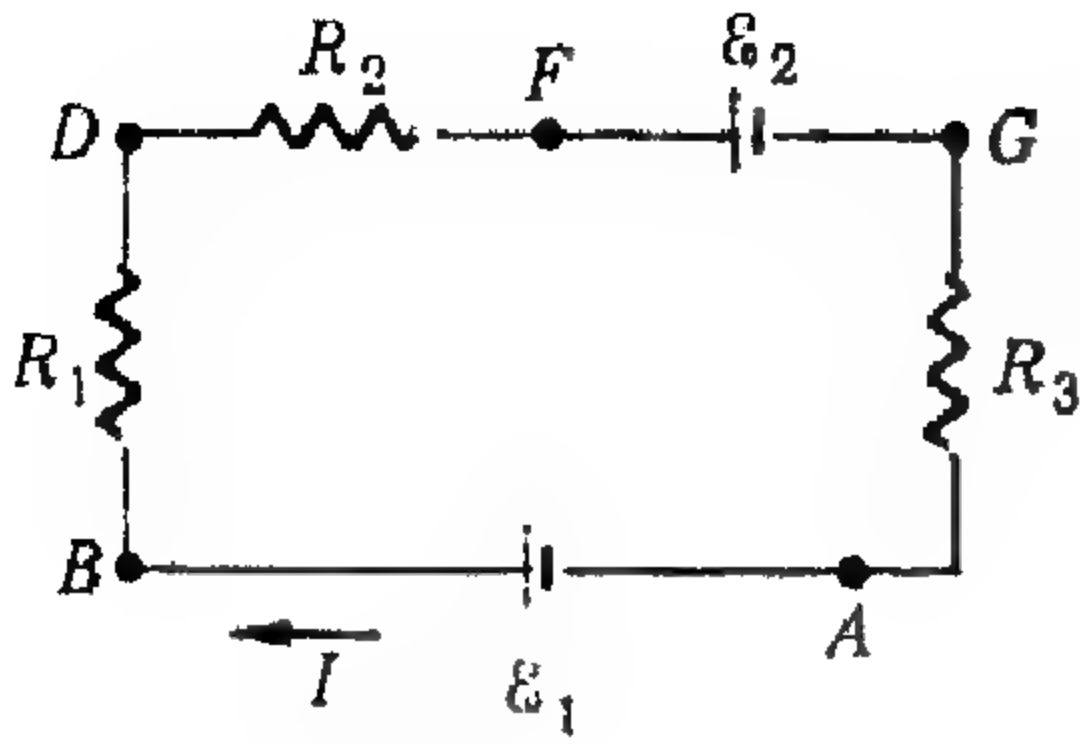
$$I_1 + I_2 + I_3 = I$$

وهي معادلة مطابقة للمعادلة الخاصة بالنقطة A . سنلخص هذه النتيجة فيما يسمى بقاعدة النقطة لكيرتشف :



شكل (١٨ - ١)
نفيد قاعدة النقطة بأن
 $I = I_1 + I_2 + I_3$
وأن $I_4 + I_7 = I_5 + I_6$

مجموع كل التيارات الداخلة الى نقطة ما يجب أن يساوى مجموع كل التيارات الخارجة من هذه النقطة قاعدة النقطة



سنكتشف أن هذه القاعدة البسيطة على درجة كبيرة من الأهمية . هل يمكنك أن توضح كيف يمكن بتطبيق هذه القاعدة على الشكل (١٨ - اب) أن تصل الى أن $I_4 + I_7 = I_5 + I_6$

١٨ - ٢ قاعدة العروة (أو الدائرة) لكيرتشف

تنطبق هذه القاعدة الثانية على الدوائر التي يكون فيها التيار ثابتاً أو متغيراً ببطء * وفي هذه الحالات يكون المجال الكهربائي بالقرب من الدائرة مجالا ساكنا (كهروستاتيكية) بالضرورة . وتحت مثل هذه الظروف يكون المجال احتفاظيا بمعنى أن الشغل المبذول لحمل شحنة اختبار موجب من نقطة لاخرى لا يكون معتمدا على المسار المتبع . ولنر الآن ماذا يمكن أن نقول عن الدائرة الكهربية في الشكل (١٨ - ٢) .

افترض أننا بدأنا عند النقطة A في الدائرة وقمنا بحمل شحنة اختبار موجبة على طول الدائرة مارين بالنقط B ، D ، F ، G ، لنعود مرة أخرى الى A . ماهي الكمية الكلية للشغل الذي بذلناه لحمل شحنة الاختبار حول الدائرة حتى عدنا مرة أخرى لنقطة البداية ؟ . حيث أن هذا قد حدث في مجال احتفاظي فالاجابة هي صفر .

والموقف هنا يشبه الى حد كبير الموقف الذي يتضمن مجالا للجاذبية وهو أيضا مجال احتفاظي . افترض انك نهضت في الصباح من فراشك وانك عدت اليه ليلا . كمية الشغل الصافية التي بذلتها طوال اليوم على جسدك ضد مجال الجاذبية هي صفر . وحيث أن نقطتي البداية والنهاية هما نفس النقطة لذا فطاقة وضع الجاذبية لجسدك لم تتغير . ويكون الشغل الكلي المبذول ضد الجاذبية صفر .

نلاحظ في حالة الدائرة الكهربية في شكل (١٨ - ٢) صفة مألوفة . اذا حملنا شحنة اختبار موجبة حول الدائرة وعدنا بها مرة أخرى الى نقطة البداية ، فإن الشغل الكلي المبذول يكون صفر . وهذا يجب أن يعنى أن الشحنة قد حملت خلال كميات متساوية من الجهد المرتفع والجهد المنخفض والأثر النهائى لتغيرات الجهد هذه (ارتفاع الجهد سيعتبر موجبا وانخفاضه سالبا) أن المجموع الجبرى لها يكون صفر . وهذه الحقيقة يمكن تلخيصها في قاعدة العروة (أو الدائرة) لكيرتشف :

* كما سنرى مستقبلا فإن التيار اذا كان مترددا في مدى الترددات الميكرونية (10^9 Hz) فإن القوى الدافعة الكهربية التأثيرية في د . د . ك في عروة الدائرة تصبح هامة .

« المجموع الجبرى لتغيرات الجهد حول دائرة مغلقة يجب أن يساوى صفرا »

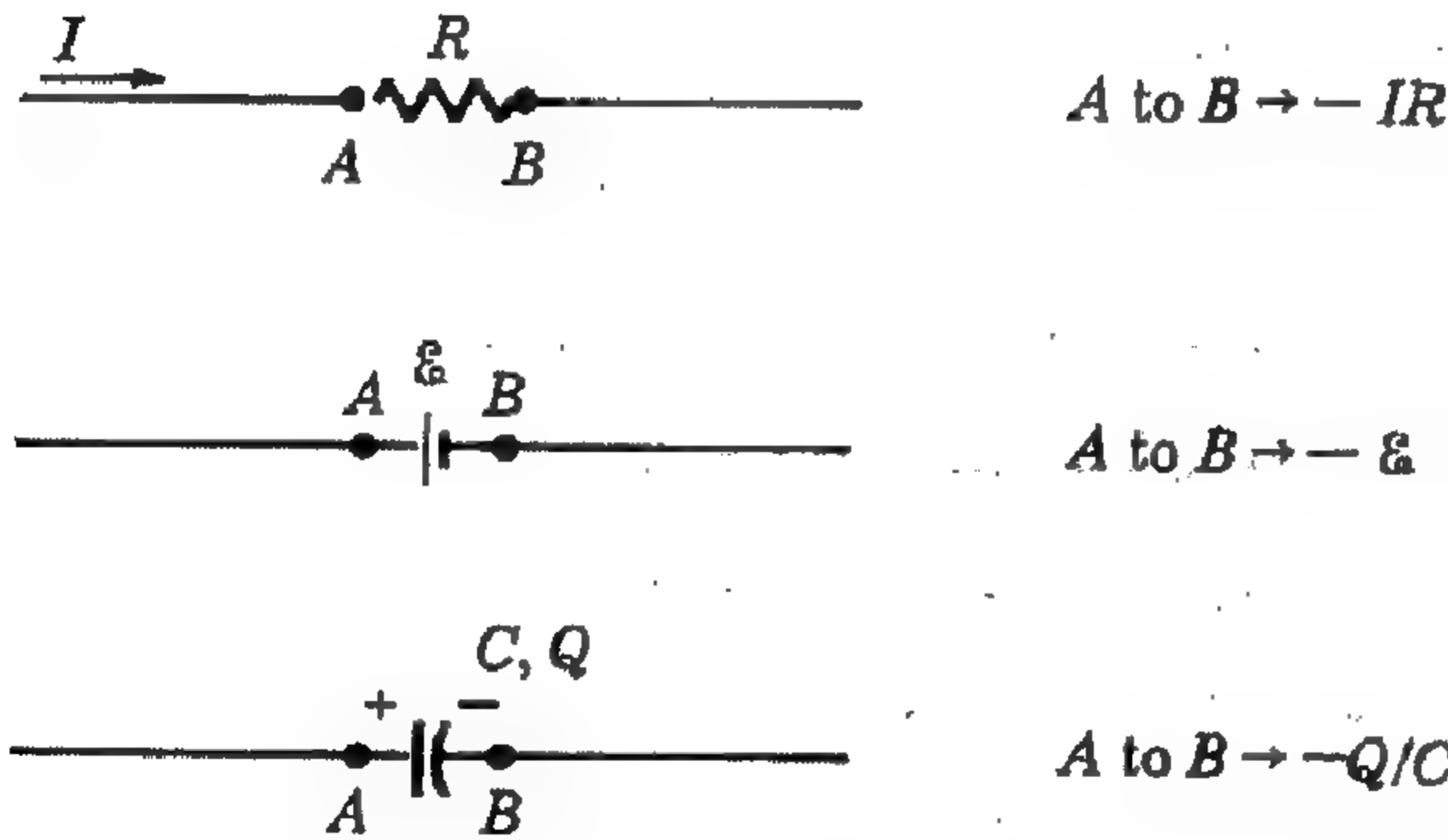
وبطريقة أخرى اذا بدأنا عند نقطة ما فى دائرة وتحركنا حول هذه الدائرة بحيث نرجع الى نقطة البداية ، فإن المجموع الجبرى لارتفاع وانخفاض الجهد اللذين نقابلهما يجب أن يكون صفرا . ونعتبر انخفاض الجهد سالبا وارتفاعه موجبا .

كما نرى ، ترتبط قاعدة العروة ارتباطا وثيقا بتغيرات الجهد ، ولهذا السبب سنقوم باستعراض كيفية تغير الجهد اذا ما تحركنا عبر مقاوم ، بطارية ، ومكثف .

افترض اننا نتحرك من A الى B عبر المقاوم الموضح فى شكل (١٨ - ٣) اننا نعلم ان التيار يسرى دائما من الجهد العالى الى المنخفض خلايا مقاوم ما . وعلى هذا فان النقطة A تقع عند جهد أعلى من جهد النقطة B . ونتيجة لهذا يكون التغير فى الجهد من A الى B عبارة عن انخفاض فى الجهد . ويفيدنا قانون أوم بأن مقدار هذا الانخفاض هو IR . والتغير فى الجهد عند الانتقال من A الى B يساوى $-IR$. والاشارة السالبة تعنى انخفاض الجهد .

شكل (١٨ - ٣)

فى كل من الحالات الموضحة ، يكون الانتقال من A الى B انخفاض فى الجهد او تغير سالب فى الجهد . فى الاتجاه المضاد يكون تغير الجهد موجبا .
(١) الى



اذا ما نظرنا الى البطارية فى الشكل ١٨ - ٣ لتذكرنا أن رمزها يفيد بأن الجانب الأيسر موجب . وعلى هذا تكون النقطة A أعلى فى الجهد بمقدار ϵ عن النقطة B وبالانتقال من A الى B يكون التغير فى الجهد هو $-\epsilon$

فى حالة المكثف ، يجب ذكر أى اللوحين مشحون بشحنة موجبة ، وحسب الرسم فان اللوح A هو الموجب ، ولذا فهو عند الجهد الأعلى . ولما كان فرق الجهد عبر المكثف يعطى بالمعادلة $Q = CV$ أى أنه يساوى Q/C لذا فتغير الجهد فى الانتقال من A الى B يكون مساويا $-Q/C$.

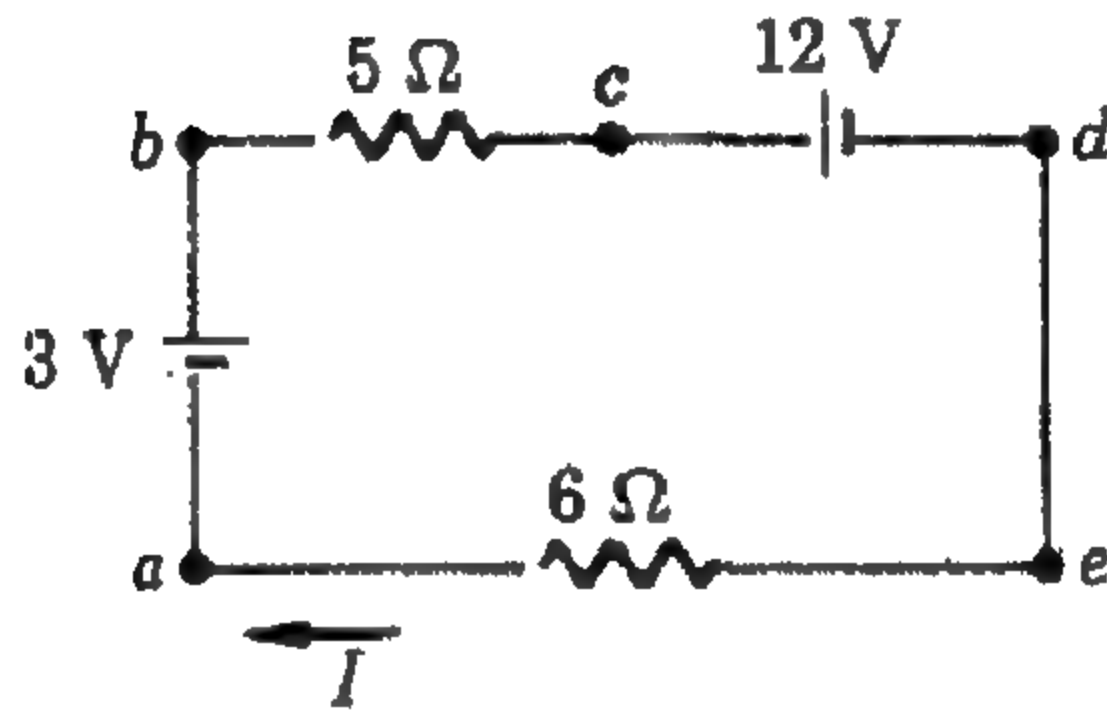
عند الانتقال من A الى B فى كل من الحالات الثلاث كان تغير الجهد سالبا ولو أن الانتقال كان من B الى A اذن لكان التغير فى الجهد موجبا . ولنحاول الآن

استخدام قاعدة العروة في بعض الدوائر البسيطة قبل أن تنتقل الى تطبيقاتها الأكثر جدية .

مثال توضيحي ١٨ - ١ : اوجد التيار الذي يسرى في الدائرة المرسومة في الشكل ١٨ - ٤ .

طريقة الحل : دعنا نحمن أن التيار سوف يسرى في الاتجاه المبين . (لابد أنك ستعترض أن هذا خطأ حيث أن البطارية ١٢ - ٧ سيكون لها تأثير أكبر من البطارية ٧ - ٣ ولكن من أحسن الأشياء حول قواعد كيرتشف أنهما قابلة للاستعمال حتى من قبل أسوأ المحمين كما سنرى) نختار نقطة ما مثل a ونتحرك حول الدائرة . تكون تغيرات الجهد بالفولت كما يلي :

$$\begin{aligned} a \rightarrow b: & +3 \\ b \rightarrow c: & -5I \\ c \rightarrow d: & -12 \\ e \rightarrow a: & -6I \end{aligned}$$



شكل ١٨ - ٤
حين نقوم بحل هذه الدائرة
فكيف يمكن من الإجابة
معرفة ماذا كان اختيارنا
لاتجاه التيار I كان خاطئاً ؟

عليك بفحص هذه الكميات للتأكد من الاشارات المستخدمة . يجب أن يكون مجموع هذه التغيرات في الجهد مساوياً للصفر . وعلى هذا

$$3 - 5I - 12 - 6I = 0$$

إذا ماحللنا من اجل الحصول على I نجد ان $I = \frac{9}{11}A$. تفيدنا الاشارة السالبة أننا قمنا بتخمين الاتجاه الخاطئ للتيار ، وليس هناك مايسوء

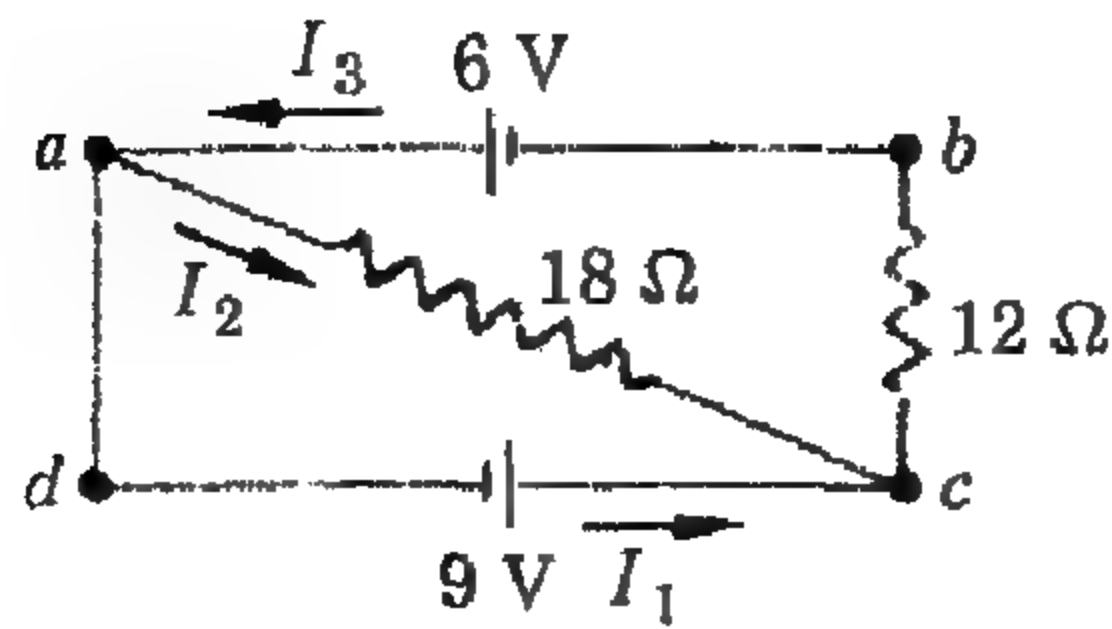
افترض أننا درنا حول الدائرة في الاتجاه المضاد ، ستكون المعادلة في هذه الحالة هي :

$$+6I + 12 + 5I - 3 = 0$$

ومنها يكون التيار $I = -\frac{9}{11}A$ كما سبق .

عند حل هذه الدائرة ، كن متأكدا انك قد فهمت اختيارنا لاشارات تغيرات الجهد . ولاحظ ايضا ان التيار هو نفسه في جميع نقط الدائرة . لماذا ؟

مثال توضيحي ١٨ - ٢ : اوجد التيارات التي تسرى في جميع أسلاك الدائرة في الشكل (١٨ - ٥)



شكل (١٨ - ٥)
اوجد التيارات التي تسرى في
الاسلاك الثلاثة .

طريقة الحل : سنقوم بتعيين تيارات لجميع الأسلاك واعطاء كل من هذه التيارات رمزا واتجاها خاصين . ومرة أخرى سننقق بعض الوقت في محاولة تخمين الاتجاه الصحيح لأن الاجابة ستشير على أية حال الى الاتجاه .

لنبدأ من النقطة a متتبعين العروة acda ثم نكتب قاعدة العروة ، لدينا بالفولت (تأكد من فهمك للاشارات المستعملة) .

$$-18I_2 - 9 = 0$$

ومنها نجد على الفور أن ،

$$I_2 = -0.50 \text{ A}$$

أى أن التيار يسرى في اتجاه عكس كما هو مبين .

دعنا الآن نتحرك حول العروة abca ، لدينا

$$-6 + 12I_3 - 9 = 0$$

ومنها

$$I_3 = 1.25 \text{ A}$$

ويمكننا أيضا كتابة معادلة العروة abca ولكننا لن نحصل على أية تغييرات جديدة في الجهد أى أن مثل هذه المعادلة لن تحتوى على معلومات جديدة ولهذا فهي زائدة عن الحاجة .

سنقوم بدلا من هذا بكتابة قاعدة النقطة بالنسبة للنقطة c ، وهى

$$I_1 + I_2 = I_3$$

بالتعويض فاننا نجد ، بوحدات الأمبير ampere

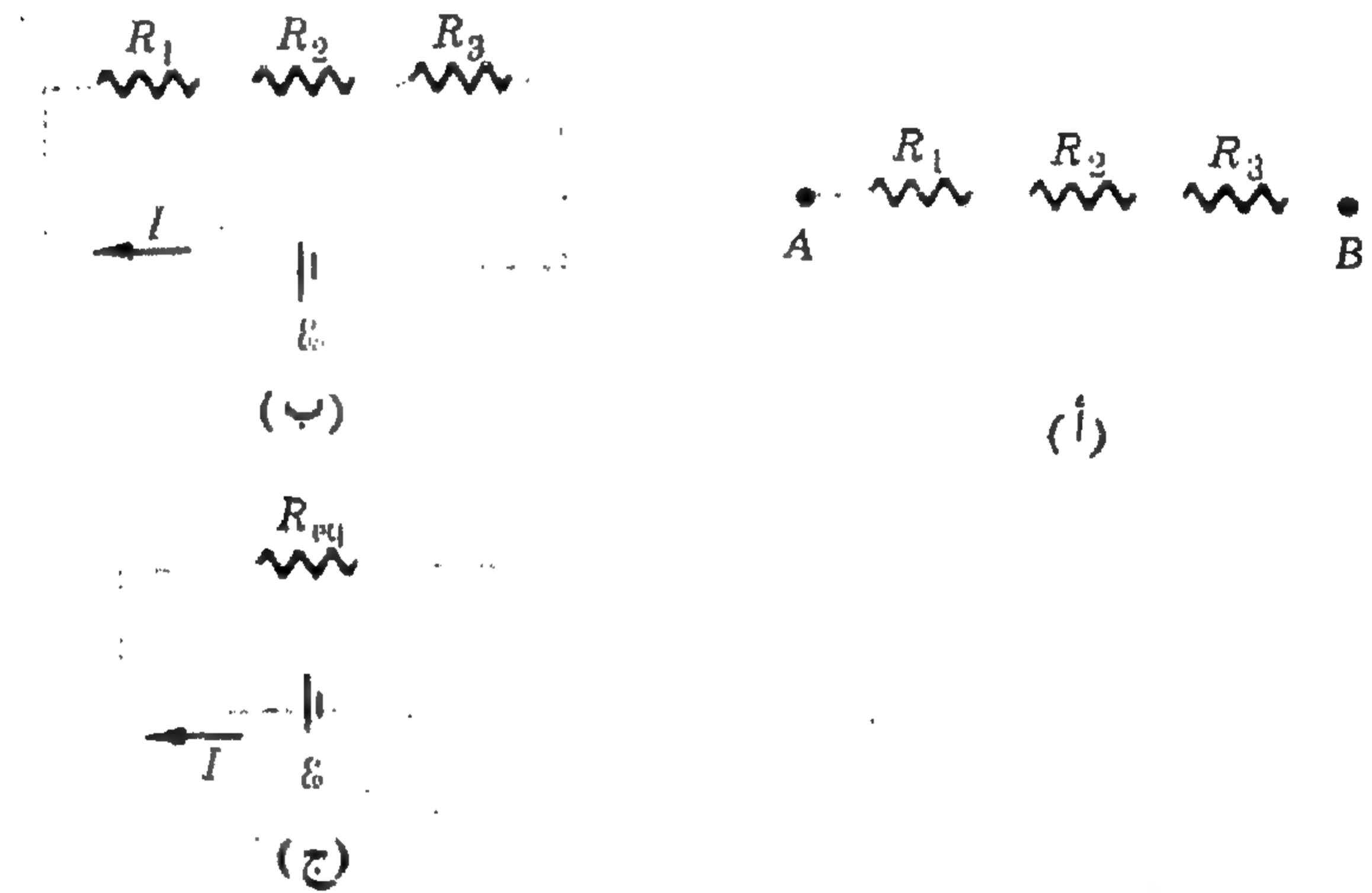
$$I_1 - 0.50 = 1.25$$

لاحظ اننا نحمل الاشارات الصحيحة لكل من I_2 و I_3 وبحل هذه المعادلات نجد

$$I_1 = 1.75 \text{ A}$$

١٨ - ٣ المقاومات على التوالي وعلى التوازي

هناك طريقتان لترتيب المقاومات في الدوائر الكهربائية يمكن تبسيطهما بسهولة .
واذا ما عرفناهما سيقبل العبء كثيرا عند حل أية مسألة . يبين الشكل (١٨ - ١٦)
أول هذه الطرق في الترتيب .



شكل (١٨ - ٦)
المقاومات الثلاث متصلة على
التوالي ، وهي تكافئ
 $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$

فالمقاومات بهذه الطريقة يقال انها على التوالي : ولانتقال من النقطة A الى النقطة B لا يوجد الا مسار واحد وهذا المسار يمر خلال جميع المقاومات .

لو وصلنا هذه المجموعة عبر بطارية كما في الجزء (ب) فلنا أن نختار أنها ستعمل كما لو كانت مقاوما واحدا يساوى المجموع $R_1 + R_2 + R_3$ وفيما يلي سنثبت أن هذا التخمين صحيح ، أما ما نرجوه الآن فهو أن نجد المقاوم المكافئ R_{eq} في الجزء جـ من الشكل والذي يقوم بسحب نفس التيار الذي تسحبه المجموعة في الجزء بـ . ولهذا سنقوم بالاستفادة من قاعدة العروة للدوائر المرسومة في الأجزاء بـ ، جـ .

إذا درنا في اتجاه عقرب الساعة حول الدائرة في الجزء بـ فاننا نحصل على معادلة العروة الآتية :

$$+\mathcal{E} - IR_1 - IR_2 - IR_3 = 0$$

وهذه يمكن كتابتها على الصورة الآتية :

$$\frac{\mathcal{E}}{I} = R_1 + R_2 + R_3$$

بكتابة معادلة عروة مشابهة بالنسبة للجزء جـ فإن :

$$+\mathcal{E} - IR_{eq} = 0$$

ومنها

$$\frac{\mathcal{E}}{I} = R_{eq}$$

من المعادلتين نرى أن :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 \quad \text{على التوالي} \quad (١٨ - ١)$$

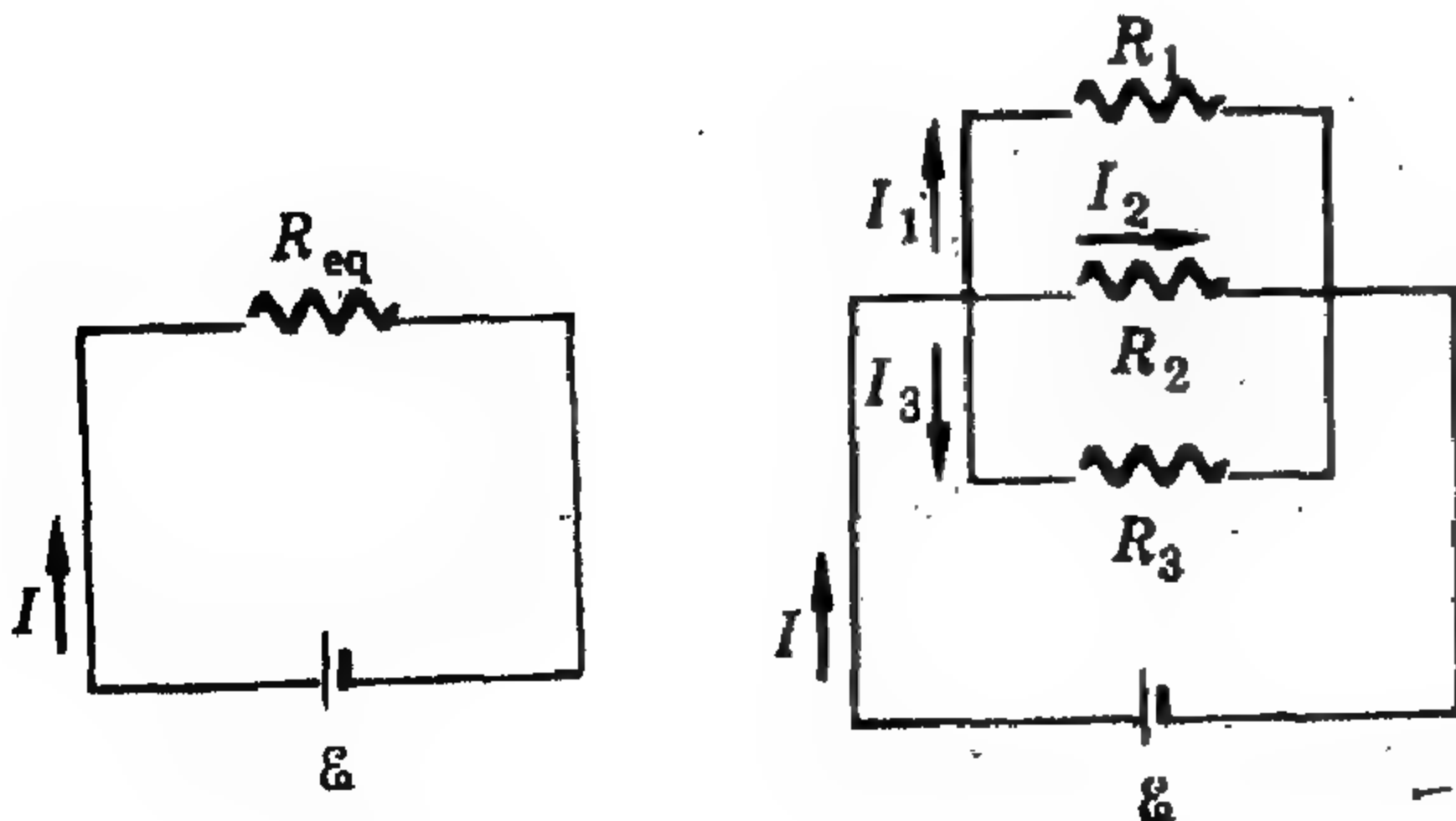
وعلى العموم يمكن القول بأن :

إذا كانت هناك مجموعة من المقاومات متصلة على التوالي فإنها تكافئ
مقاوما واحدا يساوى مجموعها

مقاومة القوة المكافئة

هناك طريقة أخرى شائعة لترتيب المقاومات مبينة في الشكل (١٨ - ١٧) .
يقال أن هذه المقاومات على التوازي ، وفي هذه الطريقة تتصل نهاية كل
مقاوم بالنقطة A وتتصل النهاية الثانية لكل مقاوم بالنقطة B . وحين يكون
هناك فرق للجهد عبر المجموعة ، كما في الجزء ب من الشكل ، فإن نفس فرق
الجهد يكون عبر كل مقاوم . نود الآن أن نجد المقاوم المكافئ R_{eq} والموضح في
الجزء جـ والذي يمكن أن يحل محل المجموعة ويظل يسحب نفس التيار .

المقاومات على التوازي



(ج)

(ب)

(أ)

شكل (١٨ - ٧)
المقاومات الثلاث على
التوازي . والمكافئ لها يعطى
بالمعادلة

$$1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

نلاحظ في الشكل ١٨ - ٧ أن فرق الجهد عبر كل مقاوم هو \mathcal{E} ومن قانون أوم نجد أن

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1} \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} \quad I_3 = \frac{\mathcal{E}}{R_3}$$

ولكن قاعدة النقطة تفيد بأن

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

ولذا فإن

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1} + \frac{\mathcal{E}}{R_2} + \frac{\mathcal{E}}{R_3}$$

وبعد إعادة ترتيب الحدود تصبح ،

$$\frac{I}{\mathcal{E}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

والآن لننظر للدائرة المرسومة في الجزء (ج) . تفيد قاعدة العروة بأن

$$+\mathcal{E} - IR_{eq} = 0$$

ومنها

$$\frac{I}{\mathcal{E}} = \frac{1}{R_{eq}}$$

يمكننا الآن مساواة المعادلتين اللتين تحويان على I/\mathcal{E} لنجد :

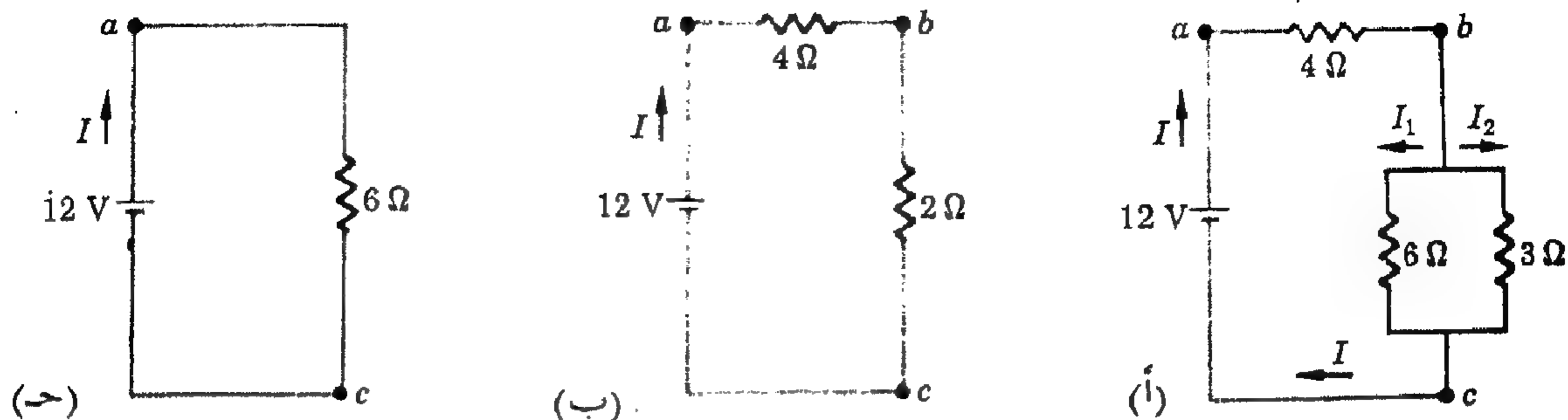
$$(١٨ - ٢) \quad \text{على التوازي} \quad \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

وعلى العموم يمكن القول بأن :

إذا كانت هناك مجموعة من المقاومات متصلة على التوازي فإن مقلوب مقاومتها المكافئة يساوي مجموع مقلوبات هذه المقاومات

فلنقم الآن بعمل عدة أمثلة تدريبية لنرى بوضوح أكثر كيف يمكن الحصول على هذه المقاومات المكافئة والافادة منها .

مثال توضيحي ١٨ - ٣ : اوجد التيار الذى يسرى من البطارية فى الشكل ١٨ - ١٨ .



طريقة الحل : كان من الممكن أن تحل هذه المسألة باستخدام قاعدة كيرتشف ، إلا أنه من الأبسط عادة أن تدجج المقاومات التى على التوالى وعلى التوازي قبل كتابة معادلات العروة . ويمكن خفض المقاومات الموضحة فى الأجزاء (ب) ، (ج) من الشكل . ولنقم أولاً بدجج المقاومين اللذين على التوازي بين النقطتين b ، c فيكون لدينا :

شكل ١٨ - ٨
المقاومة المتصلة على التوازي بين b و c تكافئ 2Ω كما هو موضح فى الجزء ب المقاومات التى على التوالى فى (ب) يمكن أن تضم معا كما فى (ج)

$$\frac{1}{R_{bc}} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{1}{6} + \frac{2}{6} = \frac{3}{6}$$

أو

$$R_{bc} = 2\Omega$$

نقوم الآن برسم دائرة مكافئة كما فى الشكل ١٨ - ٨ ب . المجموعة المتوازية حل محلها مقاومة مكافئة . ونشاهد المقاوم 4Ω والمقاوم 2Ω وقد اتصلا على التوالى بين النقطتين a ، c ويكون المكافئ لهما هو

$$R_{ac} = 4 + 2 = 6\Omega$$

نقوم الآن برسم دائرة مكافئة جديدة كما فى الجزء (ج) ، حيث يمكننا بسهولة تطبيق قانون أوم . يبلغ فرق الجهد عبر المقاوم 6Ω ما قيمته $12V$ وعليه يكون لدينا

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12V}{6\Omega} = 2A$$

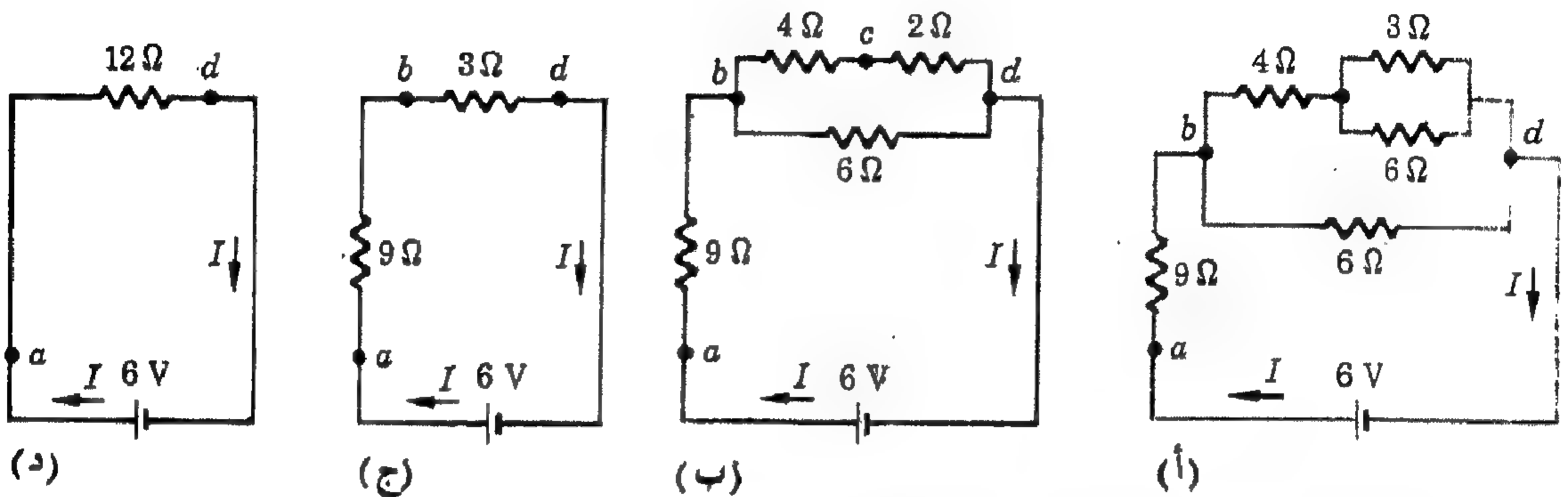
وهى النتيجة المطلوبة .

مثال توضيحي ١٨ - ٤ : اوجد التيار الذى يسرى من البطارية فى الشكل (١٨ - ١٩) .

طريقة الحل : لدينا هنا أيضا مقاومان متوازيان وهما 3Ω و 6Ω ويمكن ابدالهما بالمقاوم 2Ω كما في الجزء ب . حيث يكون المقاومان 2Ω ، 4Ω على التوالي بحيث يكون مكافئهما هو المقاوم 6Ω ، ولكن هذا المقاوم المكافئ يكون على التوازي مع المقاوم 6Ω : باستخدام معادلة المقلوبات نجد أن المقاومين 6Ω المتصلين على التوازي يكافئان مقاوما قدره 3Ω كما هو موضح في الجزء (ج) . وفي النهاية يمكن اختصار الدائرة الى الشكل الموضح في الجزء (د) . وباستخدام قانون أوم ، يصبح لدينا :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6V}{12\Omega} = 0.50A$$

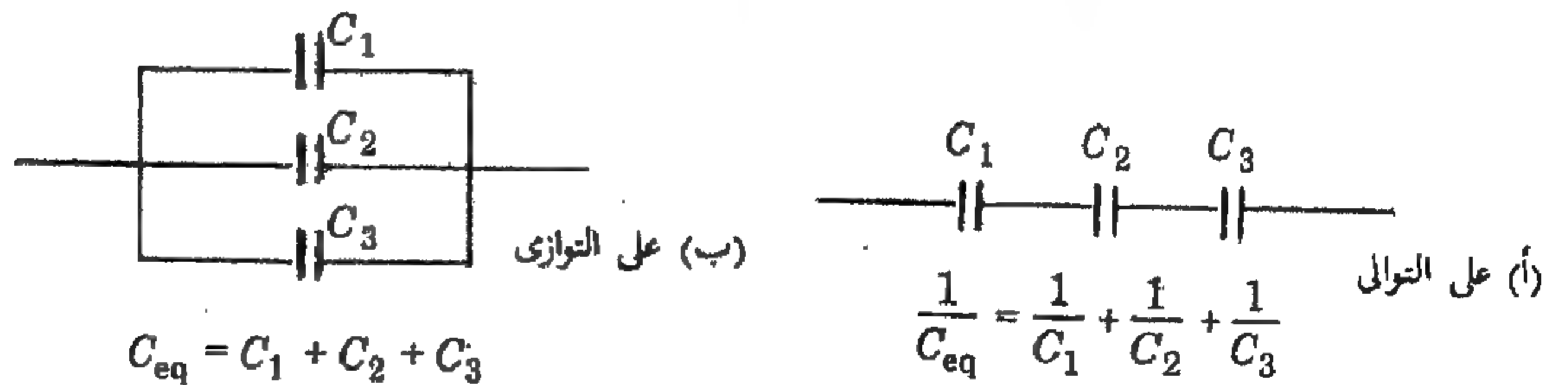
شكل ١٨ - ٩
الدائرة المركبة في (أ) يمكن
اختصارها الى دائرة مكافئة
بسيطة كما في (د)



١٨ - ٤ المكثفات على التوالي وعلى التوازي

لن نقوم بفحص هذا الموقف بالتفصيل . وبدلاً من هذا نعرض طريقتين لترتيب المكثفات في الشكل (١٨ - ١٠ أ) ، ب حيث ترى النتائج الخاصة بالمكثفات المكافئة في كل حالة . وسنحصل على هذه النتائج من خلال المسائل الواردة في نهاية هذا الفصل . لاحظ أن العلاقات هي بالضبط عكس العلاقات التي أوجدناها للمقاومات المكافئة . تضاف المكثفات المتوازية مباشرة بينما تضاف مقلوباتها حين تكون المكثفات على التوالي

شكل (١٨ - ١٠)
اختصار المكثفات التي على
التوالي وعلى التوازي



١٨ - ٥ حل مسائل الدائرة

أصبح لدينا الآن الأدوات المطلوبة لحل معظم مسائل دوائر التيار المستمر (dc) . وقبل أن نقدم على استعمالها دعنا نذكر بعض الحقائق التي يجب تذكرها

أثناء التطبيق . وعلى الرغم من أن كل مسألة لها ظروفها الخاصة إلا أن الأسلوب التالى يكون دائما مفيدا .

١ - ارسم الدائرة .

٢ - عين تيارا واتجاها محددا لكل سلك هام . كن حريصا على استعمال رمز واحد للتيار الذى يمر فى سلك معين حتى لو كان هذا السلك يحتوى على عدة عناصر . اذا خرج سلك فرعى من السلك الرئيسى فان التيارات على الجانبين يجب عادة اعتبارها مختلفة .

٣ - اختصر مجموعات المقاومات التى على التوالى وعلى التوازى كلما أمكن ذلك .

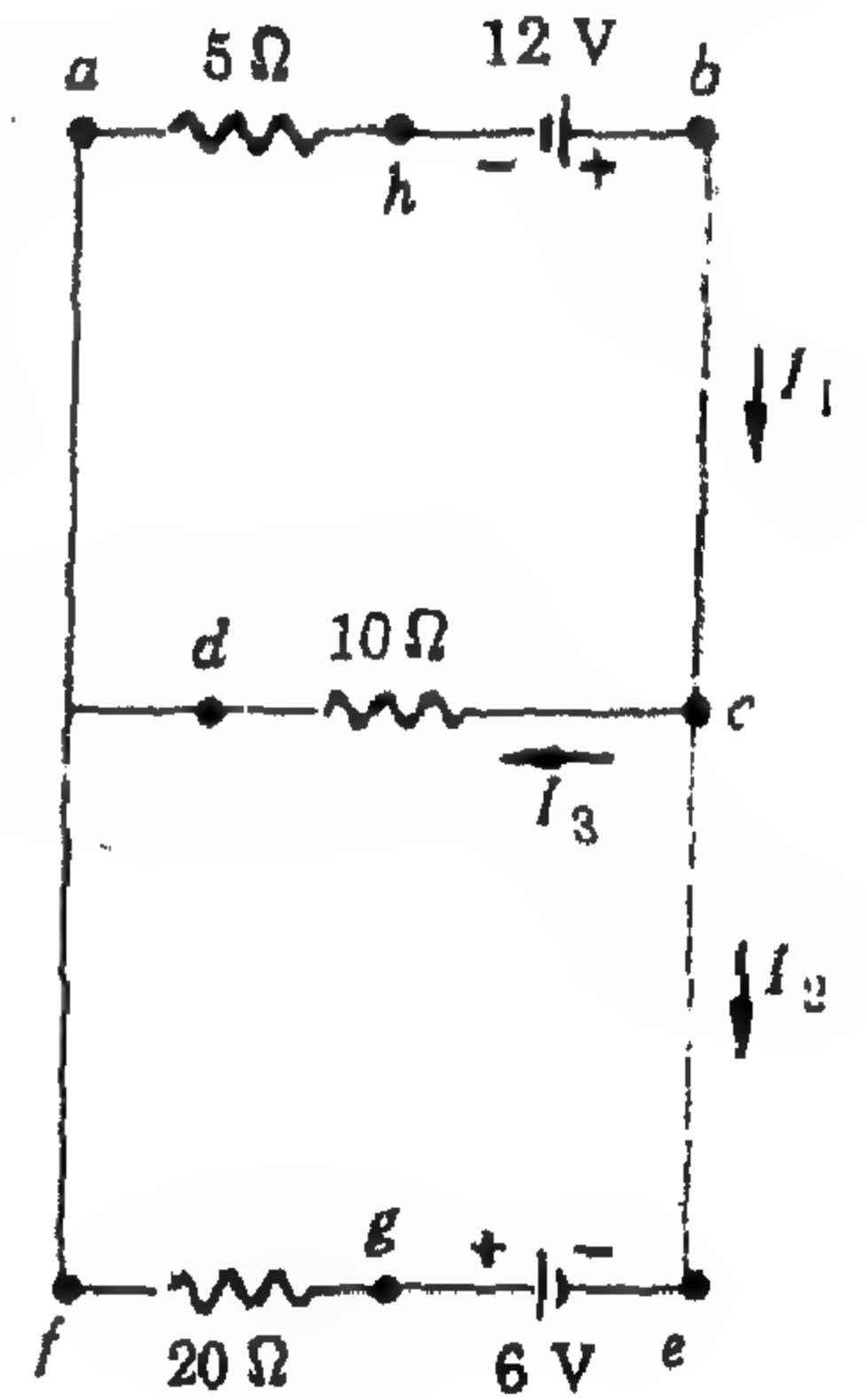
٤ - اكتب معادلات العروة للدوائر المتبقية متذكرا انه مالم تحتو المعادلة على معلومات جديدة عن تغيرات الجهد فانها تكون زائدة عن الحاجة .
٥ - اكتب معادلات النقطة بالنسبة لنقط الاتصال ومالم يكون هناك تيار جديد فى معادلة ما فان هذه المعادلة تصبح زائدة عن الحاجة .
٦ - حل هذه المعادلات سعيا وراء الكميات المجهولة .

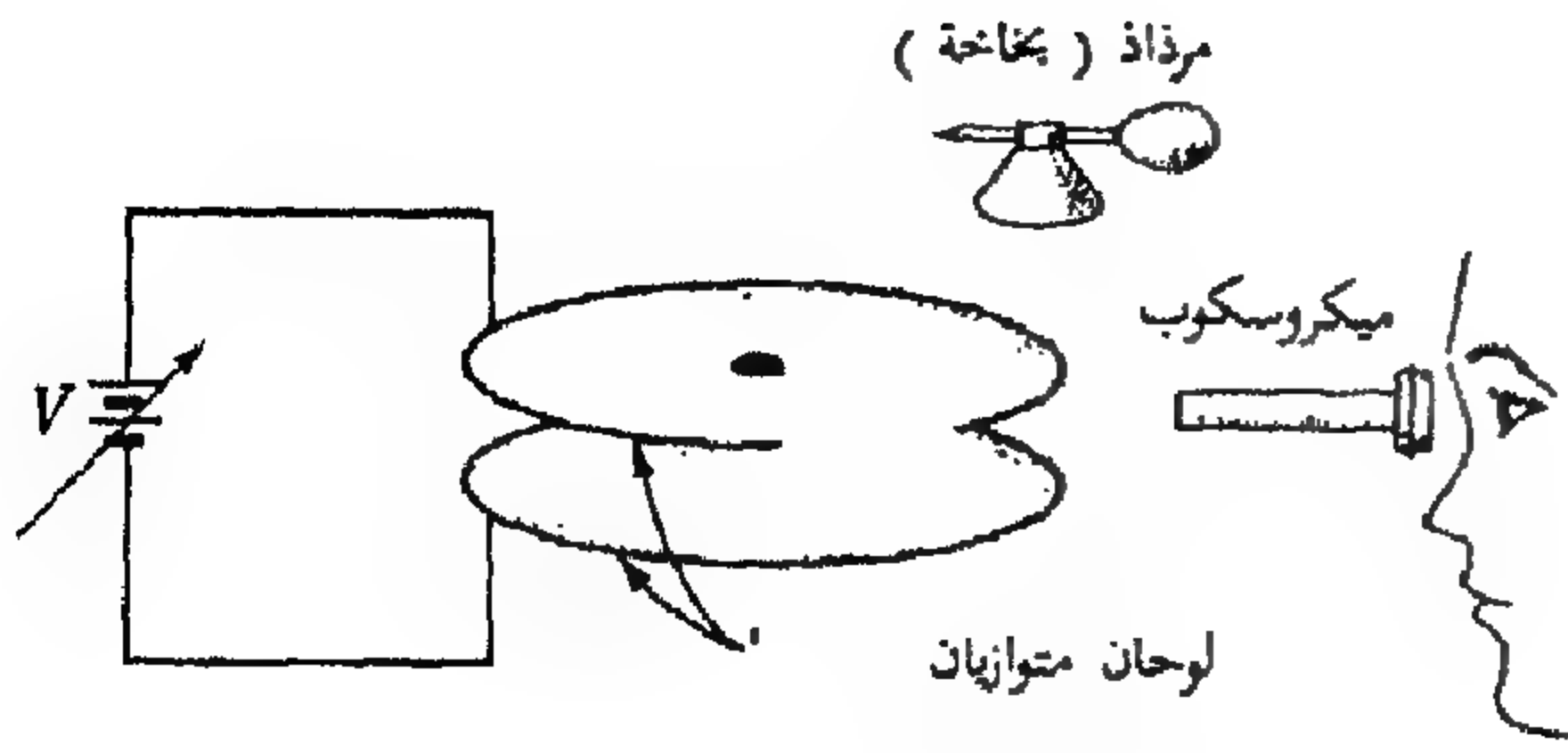
ولنقم الآن بدراسة الأمثلة

مثال توضيحي ١٨ - ٥ : اوجد التيارات الموجودة فى أسلاك الدائرة الموضحة فى الشكل (١٨ - ١١)

طريقة الحل : الخطوتان ١ ، ٢ المذكورتان فى الطريقة السابقة مكتملتان فى الشكل . فليس هناك مجموعة بسيطة من المقاومات (المقاومات فى ab و ef ليست على التوازى مع المقاومة الوسطى لأن الاطراف الى اليمين منهما متصلة ببطاريات وليست بينهما نقط مشتركة) .

شكل (١٨ - ١١)
دائرة يمكن حلها بسهولة
بواسطة قاعدة كيرشوف





تجربة قطرة الزيت لميليكان

تمكن ر. أ. ميليكان ومساعدوه (١٩٠٩ - ١٩١٣) من قياس كم الشحنة أو شحنة الإلكترون e لأول مرة بدقة . وقد كانت تجربة ميليكان من البساطة والمباشرة بحيث اثبتت دون أدنى شك أن الشحنة مكماة . ويوضح الشكل تخطيطا للجهاز المستخدم . يتكون الجهاز أساسا من لوحين معدنيين متوازيين (بينهما مسافة 1 mm ومساحة سطح كل منهما 100 cm^2) . بينهما فرق للجهد معروف ويمكن تغيير قيمته . يقوم فرق الجهد V هذا بإنشاء مجال كهربائي $E = V/d$ بين اللوحين ، حيث d هي المسافة بين اللوحين . اذا ماوجدت قطرة زيت مشحونة (ذات كتلة m وشحنة q) نفسها بين اللوحين فان قوة رأسية سوف تؤثر عليها . بضبط قيمة فرق الجهد بين اللوحين يمكن جعل هذه القوة الرأسية مساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه لقوة الجاذبية mg على القطرة . وحين يتم هذا تكون محصلة القوى على القطرة صفرا وتبقى بلا حركة . وعندها ،

$$mg = Eq$$

ومنها

$$q = \frac{mg}{E}$$

عندما يكون المجال الكهربائي E وكتلة القطرة m وكذا عجلة الجاذبية g معروفين ، فان الشحنة q التي على القطرة يمكن تعيينها .

قام ميليكان - من الناحية العملية - بالسماح لقطرات دقيقة جدا من الزيت بالتناثر من مرداذ (بخاخة) لكي تهبط من فتحة صغيرة في اللوح المعدني الأعلى . يحتوي عدد كبير من هذه القطرات على شحنات كهربية فائضة ، تكونت نتيجة لاحتكاك القطرات ببعضها البعض أثناء خروجها من المرداذ . يسلط ضوء قوى على القطرات أثناء نزولها بين اللوحين مما يجعلها تتألق ويمكن رؤيتها بسهولة خلال المجهر . وقد أمكن أيضا تغيير الشحنة على القطرات وذلك بتعريض المنطقة الكائنة بين اللوحين لشعاع ضعيف من أشعة X- كلما دعت الحاجة الى ذلك .

حسب المجال الكهربائي بين اللوحين عن طريق قياس المسافة بين اللوحين d وفرق الجهد V بين اللوحين . ولايجاد كتلة قطرة من الزيت m قام ميليكان بقياس الزمن الذي تستغرقه القطرة في الهبوط مسافة معينة خلال الهواء في حالة عدم وجود مجال كهربائي . ولما كانت القطرات تتحرك بسرعة ثابتة - هي السرعة النهائية لها - خلال المسافة المحددة ، فان قوة الجاذبية mg تساوي قوة اللزوجة والاحتكاك بين القطرة والهواء . اذا مااعتبرنا أن قوة اللزوجة تتناسب طرديا مع سرعة القطرة v فان يمكن كتابة الآتي :

$$mg \propto v$$

وقد كان أحد المصادر الأساسية للخطأ في التجربة مرتبطاً بثابت التناسب في هذه العلاقة . على أنه يمكن وبدقة معقولة - استعمال ما يسمى بقانون ستوكس Stokes' law لإيجاد قوة اللزوجة وكتابة مايلي

$$mg = 6\pi\eta av$$

حيث η هي لزوجة الهواء ، a نصف قطر القطرة . وحيث أن نصف القطر مرتبط بكتلة القطرة من خلال حقيقة أن كثافة الزيت ρ مضروبة في حجم القطرة تساوي كتلة القطرة

$$m = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho$$

ويمكن إيجاد كتلة القطرة عن طريق معرفة ρ ، η والسرعة النهائية v

وكما نرى ، إذا عرفت m ، E فإن شحنة القطرة يمكن إيجادها ، وقد أجرى ميليگان آلاف من التجارب ذات الطابع العام (وقد عدلت قليلاً للحصول على دقة أعلى) . وكانت نتائج قيم q دائماً مضاعفات صحيحة للكمية $1.6 \times 10^{-19} C$ فاستنتج أن الشحنة مكماه وأن مقدار كم الشحنة هو $1.6 \times 10^{-19} C$ التي يرمز لها بالرمز e . وجد أن كل الشحنات في الطبيعة هي مضاعفات صحيحة لهذه الكمية . وعلى وجه الخصوص فإن شحنة الإلكترون هي $-e$ أما شحنة البروتون $+e$ والقيمة المعتمدة حالياً للشحنة e هي 1.6022×10^{-19}

لنبدأ من النقطة a ونكتب معادلة العروة $abcd$ وهي معبر عنها بـ volts كالآتي :

$$(1) \quad -5I_1 + 12 - 10I_3 = 0$$

وبالمثل بالنسبة للعروة $dcefd$

$$(2) \quad +10I_3 + 6 - 20I_2 = 0$$

لدينا ثلاث كميات مجهولة I_1 ، I_2 ، I_3 أما المعادلات فاثنتان فقط ، ومعادلة العروة $abcefa$ لا تتضمن أية تغيرات جديدة في الجهد لذا نتجاهلها . للحصول على معادلة ثالثة فإننا نكتب معادلة النقطة c ، وهي :

$$(3) \quad I_1 = I_3 + I_2$$

بالتعويض عن هذه القيمة I_1 في المعادلة (1) نحصل على

$$-5I_3 - 5I_2 + 12 - 10I_3 = 0$$

التي تختصر إلى :

$$(4) \quad -5I_2 - 15I_3 + 12 = 0$$

ونستطيع الآن حل المعادلتين (٢) و (٤) آنيا .
بحل المعادلة (٢) للحصول على I_3 نجد أن

$$(٥) \quad I_3 = 2I_2 - 0.60$$

بالتعويض منها في (٤) نجد أن

$$(٥) \quad -5I_2 - 30I_2 + 9 + 12 = 0$$

ومنها

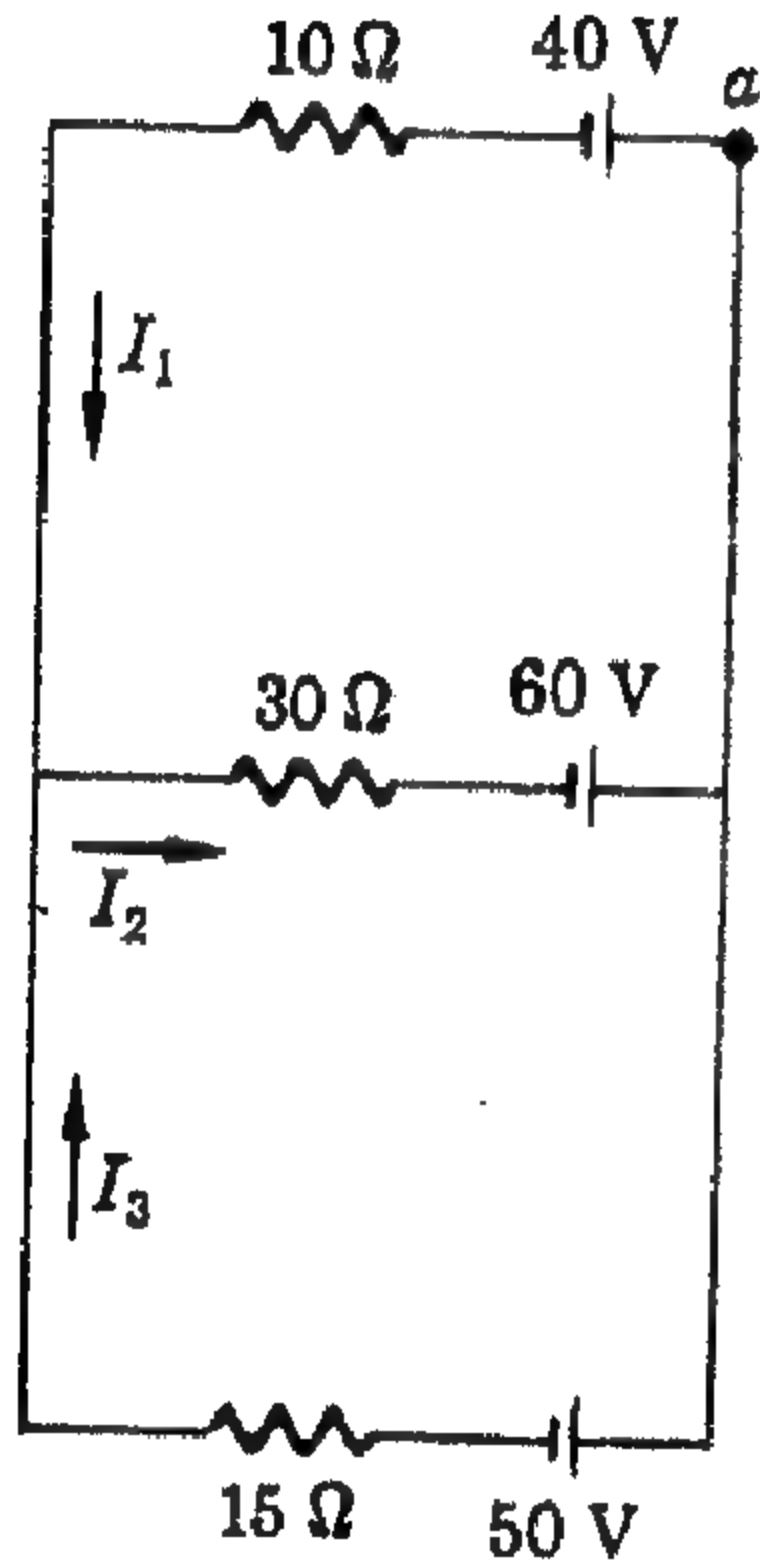
$$I_2 = 0.60 \text{ A}$$

وباستخدام هذه الكمية في (٥) نجد

$$(٦) \quad I_3 = 0.60 \text{ A}$$

والآن باستخدام (٣) نجد أن

$$I_1 = 1.20 \text{ A}$$



مثال توضيحي ١٨ - ٦ : للدائرة الموضحة في الشكل (١٨ - ١٢) اوجد I_1 ، I_2 ، I_3

طريقة الحل : سنختار التيارات بحيث تسري في الاتجاهات المبينة في الشكل مع ملاحظة أن $I_1 + I_3 = I_2$ ومن ثم تستطيع كتابة معادلات الدائرة او العروة . ستأخذ العروة التي تتضمن البطارتين 60V ، 40V ومن النقطة a ننتقل في اتجاه ضد حركة عقري الساعة ،

$$I_1 + 3I_2 = 2 \quad \text{أو} \quad -40 - 10I_1 - 30I_2 + 60 = 0$$

$$\text{ثم من النقطة a خلال البطارتين 50V ، 40V نجد أن}$$

$$-40 - 10I_1 + 15(I_2 - I_1) + 50 = 0$$

أو

$$2.5I_1 - 1.5I_2 = 1.0$$

بضرب المعادلة الثانية في 2 وجمعها على الاولى فان ،

$$I_1 = \frac{2}{3} \text{ A} \quad \text{أو} \quad 6I_1 = 4$$

باستخدام هذه القيم في المعادلة الأولى نجد

$$I_2 = \frac{4}{3} \text{ A} \quad \text{أو} \quad 3I_2 = 4$$

شكل (١٨ - ١٢)
اوجد التيارات الثلاثة المجهولة

وحيث أن $I_3 = I_2 - I_1$ فإن ،

$$I_3 = -\frac{2}{3} \text{ A}$$

من الواضح أن I_3 تسرى في اتجاه عكس ما هو مرسوم في الشكل

مثال توضيحي ١٨ - ٧ : اوجد قيم \mathcal{E} ، X ، I في الشكل (١٨ - ١٣) . يقرأ الأميتر 0.50 A أما الفولتميتر فيقرأ 16 V ، ومن طريقة توصيل كل من الأميتر والفولتميتر يعرف أن قطبية المقاوم هي كما بالشكل وأن التيار يسرى في الفرع المركزي (الأوسط) في الاتجاه المبين بالشكل .

طريقة الحل : حيث أن الفولتميتر يقرأ 16 V عبر المقاوم $8\text{-}\Omega$ فإن قانون أوم يفيد بأن التيار المار في السلك العلوى هو 2 A . ومن قطبية المقاوم الموجود بأعلى الدائرة نرى أن التيار ينتقل الى اليمين خلال السلك .

التيارات عند النقطة a من الدائرة يجب أن تكون كما هو مبين في الشكل (١٨ - ١٣ ب) . حسب قاعدة النقطة .

$$I = 2 + 0.50$$

ولذا فإن

$$I = 2.5 \text{ A}$$

وبكتابة معادلة الدائرة للعبور $abca$ وتذكر أن مقاومة الأميتر الجيد مهملة ، أى أن فرق الجهد عبره صفر فإننا نجد ،

$$-6 - \frac{1}{2}X + 16 = 0$$

ومنها

$$X = 20 \Omega$$

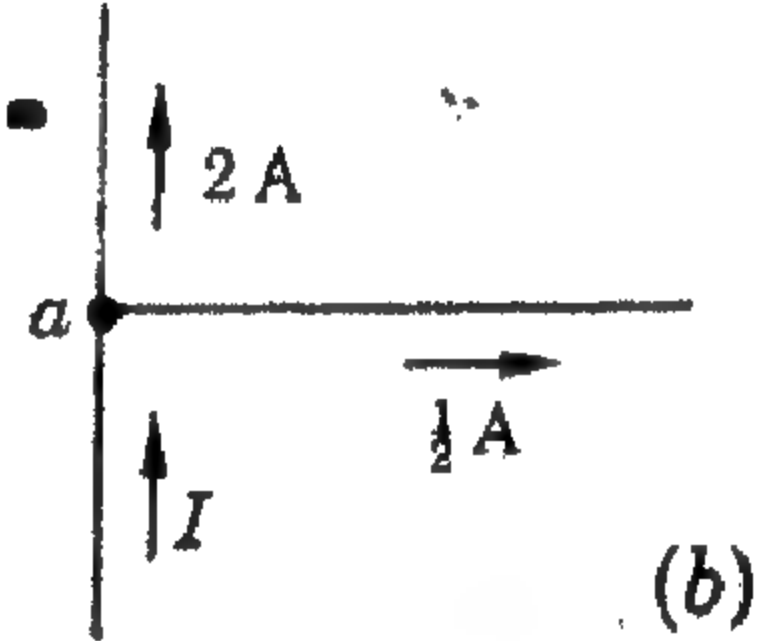
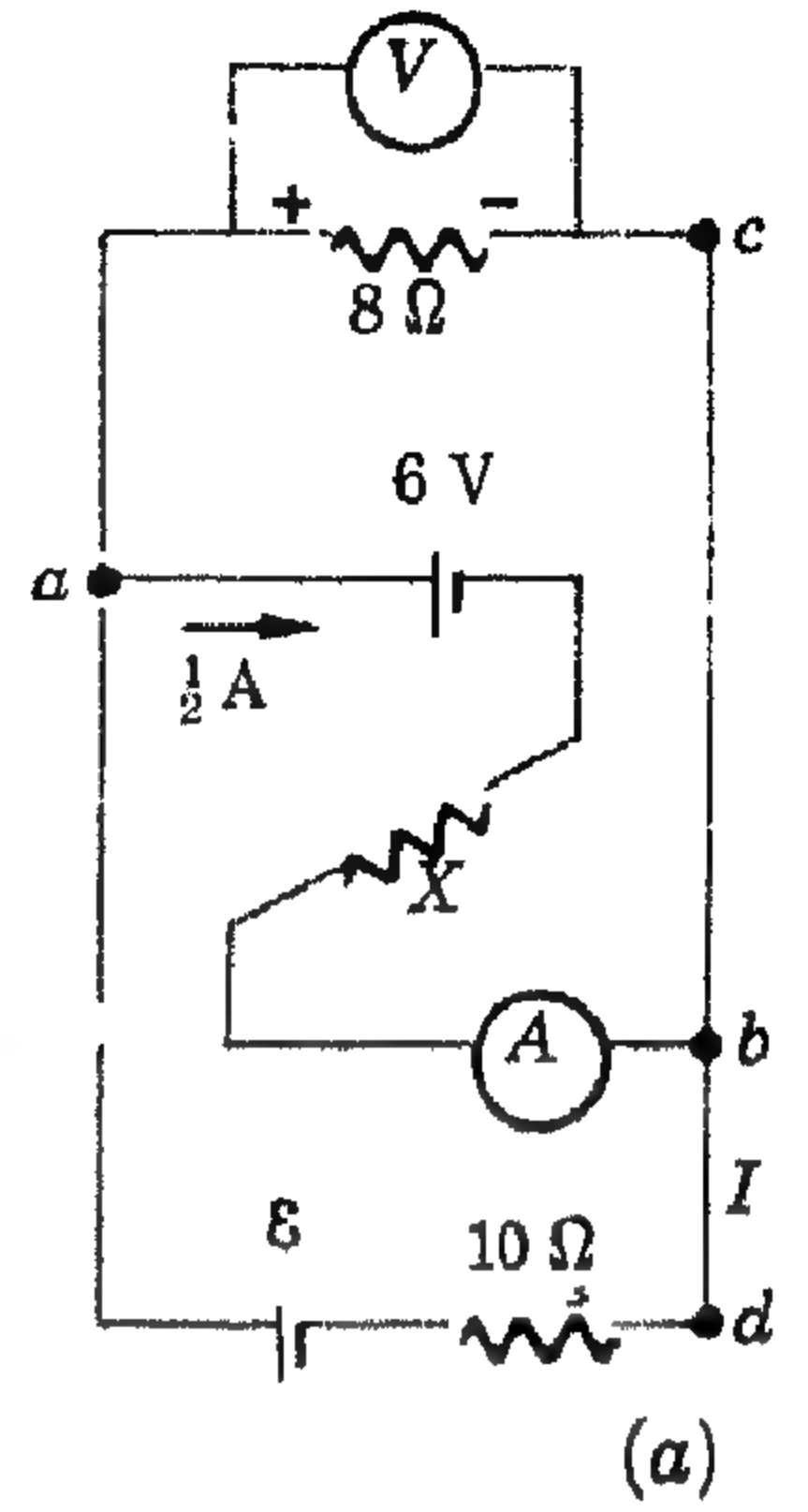
أما معادلة الدائرة للعبور $acbda$ فتعطى

$$-16 - 25 + \mathcal{E} = 0$$

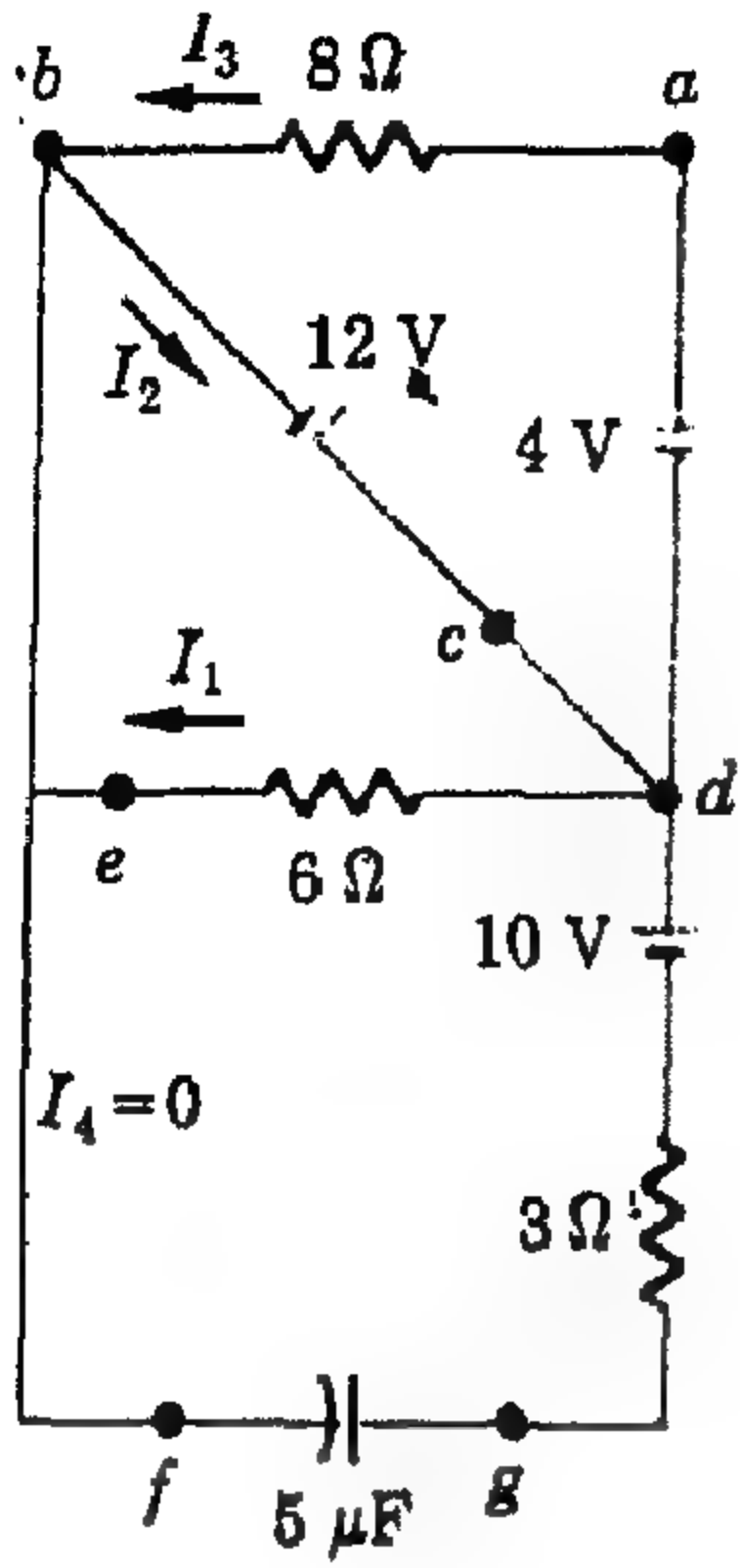
أو

$$\mathcal{E} = 41 \text{ V}$$

مثال توضيحي ١٨ - ٨ : اوجد التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 وكذا الشحنة على المكثف للدائرة المبينة في شكل (١٨ - ١٤) .



شكل (١٨ - ١٣)
قراءات الأميتر والفولتميتر
معلومتان ونود إيجاد X ، I ، \mathcal{E}



طريقة الحل : نلاحظ أولاً أنه لا يمر أى تيار فى السلك fg وذلك لأن المكثف مشحون وعلى هذا يكون $I_4 = 0$ وعلينا فقط أن نهمل هذا السلك عند حل بقية الدائرة عند النقطة d نجد أن

$$I_2 = I_1 + I_3$$

بكتابة معادلة العروة $dcbed$

$$-12 + 6I_1 = 0$$

أو

$$I_1 = 2 \text{ A}$$

وباستعمال العروة $dabcd$ فإن

$$+4 - 8I_3 + 12 = 0$$

$$I_3 = 2 \text{ A}$$

أو

$$I_2 = I_1 + I_3 = 4 \text{ A}$$

و

إذا عرفنا قيمة فرق الجهد بين النقطتين f ، g فإننا نستطيع استعمال المعادلة $Q = CV_{fg}$ لإيجاد Q . ويمكننا بسهولة إيجاد V_{fg} وذلك بالبدء من النقطة g والحركة حول الدائرة $gdefg$ مع جمع ارتفاعات وانخفاضات الجهد ، ويؤدى هذا الى

$$0 + 10 - 6I_1 + V_{fg} = 0$$

$$V_{fg} = -10 + 12 = +2 \text{ V}$$

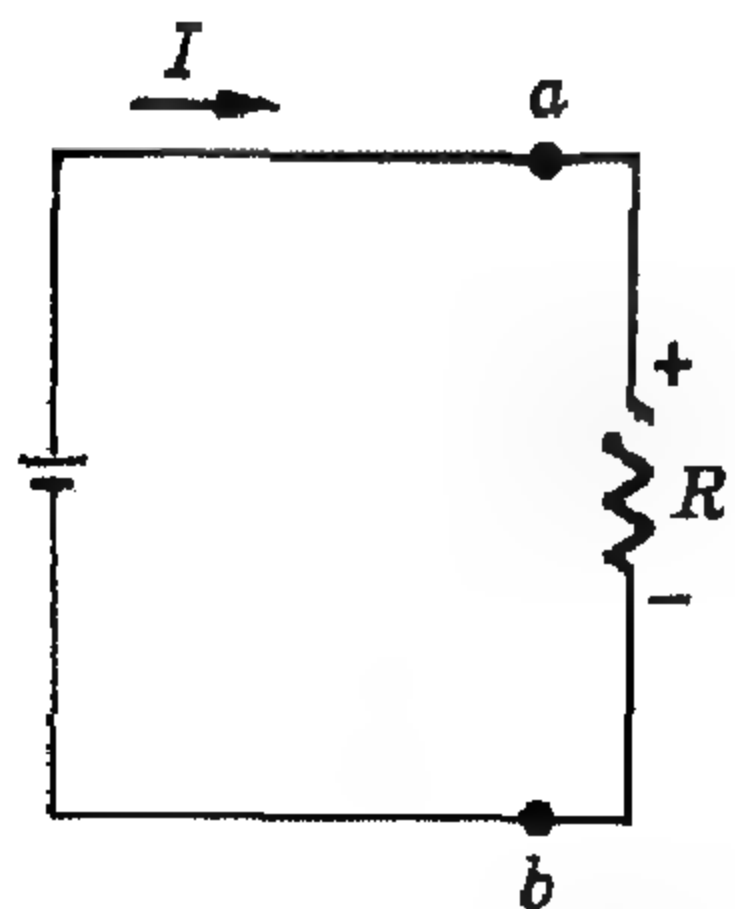
تدل الإشارة الموجبة الى أننا ارتقينا فى الجهد بانتقالنا من f الى g ولذا فإن جهة g من المكثف هى الموجبة . ولدينا الآن بالنسبة لشحنة المكثف .

$$Q = CV_{fg} = (5 \times 10^{-6})(2) = 1 \times 10^{-5} \text{ C}$$

١٨ - القدرة والتسخين الكهربائي

حين تسبب البطارية مرور التيار فى مقاوم كما فى شكل ١٨ - ١٥ فإن البطارية تمد الدائرة بالطاقة . تقوم البطارية برفع الشحنات بشكل دائم الى مرتقى الجهد خلال فرق الجهد V وهو جهد البطارية.

نعلم ان الشغل المبذول فى حمل شحنة ما q خلال فرق جهد V يعطى بالمعادلة :



شكل (١٨ - ١٥)

تظهر الطاقة التى فقدتها البطارية على هيئة حرارة فى المقاوم

$$qV = \text{الشغل المبذول}$$

فاذا نقلت الشحنة في زمن مقداره t فان الشغل المبذول في الثانية هو

$$\frac{qV}{t} = \text{الشغل / ث}$$

ولكن الشغل المبذول في الثانية هو القدرة ، لذا يصبح لدينا

$$V \frac{q}{t} = \text{القدرة}$$

ولكن التيار معرف على انه الشحنة المنقولة في الثانية ، أى ، q/t وعليه فاننا نجد أن القدرة التى أمدتها البطارية هى .

$$VI = \text{القدرة} \quad (١٨ - ٣)$$

هذه هى العلاقة للقدرة الناتجة من مصدر للتيار I يعمل عند جهد مقداره V في الحالة الراهنة تستهلك الطاقة الناتجة من البطارية داخل المقاوم ويمكن استخدام نفس التحليل العام السابق لبيان أن المعادلة (١٨ - ٣) هى أيضا تعبير عن القدرة المستهلكة في أى عنصر يمر خلاله تيار I اذا كان فرق الجهد بين طرفيه هو V . في حالة المقاوم ، فان تطبيق قانون أوم يؤدي الى صورة أخرى من المعادلة :

$$P = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R} \text{ للمقاوم} \quad (١٨ - ٤)$$

وحيث أن وحدة Volt هى عبارة عن Joules/coulomb وان التيار هو Coulomb/sec فان وحدات القدرة في هذه المعادلة تصبح Joules/sec أو Watt (وات) .

كلنا يعلم الحقيقة القائلة بأنه إذا مر تيار خلال مقاوم ما فانه يحدث تسخيناً في سلك المقاومة ، فالتيار المار في فتيلة مصباح توهج عادى يقوم بتسخين عنصر المقاومة الى درجة الإبيضاض . والافران الكهربائية بها عنصر مقاومة هو بمثابة وحدة التسخين كما في محمصة الخبز الكهربائية ، مكواة الثياب ، مجفف الملابس الكهربائى وكثير من أدوات التسخين الأخرى . والطاقة الكهربائية المستهلكة هى التى تقوم بامداد الطاقة الحرارية للمقاوم . يقوم المقاوم بتحويل الطاقة الكهربائية التى تمده بها البطارية الى طاقة حرارية . ويسمح لنا هذا التبادل بين الطاقة الكهربائية والحرارية أن نعين المكافئ الميكانيكى للحرارة بطريقة تختلف عما ناقشناه في الفصل الحادى عشر . فنحن هنا نحتاج فقط الى قياس كمية الحرارة التى ينتجها مقاوم R يحمل تيارا I . ومن السهل عمل هذا إذا وضع سلك المقاومة في مسعر به ماء . الطاقة الكهربائية التى

يُحصل عليها الماء والمسر في زمن قدره t هي بالضبط Pt أو I^2Rt ويعبر عنها بالجول Joules . أما الطاقة الحرارية بالسعر Calorie فتوجد من ارتفاع درجة الحرارة للمسر ومحتوياته . ومن ثم ، حيث أن مقادير الطاقة يجب أن تكون متساوية بدلالة أى من الوحدات Calorie أو Joules فإن معامل التحويل بينهما يصبح من السهل إيجاده . من الطبيعي أن تكون العلاقة بين الواحدات هي نفسها كما أوجدناها من قبل من دوران عجلة التجديف في الماء أو

$$1 \text{ Cal} = 4.184 \text{ J.}$$

مثال توضيحي ١٨ - ٩ : مامقدار الحرارة بالسعر (Calorie) التي يمكن أن يولدها مصباح اضاءة شدته 40w في 20 min .
طريقة الحل : يولد مصباح الاضاءة 40w حرارة مقدارها 40 J كل ثانية ومن ثم فانه في S (60) (20) ينتج ،

$$\text{حرارة} = [(20)(60)](40) = 48,000 \text{ J} = 11,500 \text{ cal} = 11.5 \text{ kcal}$$

مثال توضيحي ١٨ - ١٠ : إذا كانت الطاقة الكهربائية تكلف 10 cent لكل Kilowatt hour فما هي تكلفة ادارة مجفف قدرته 700w لمدة 30 min ؟
طريقة الحل : كل Kilowatt hour (KWh) هو عبارة عن وحدة الطاقة التي يحصل عليها الانسان اذا كانت القدرة تقاس بوحدهات Kilowatts ويقاس الزمن بالساعات hours وعليه فان :

$$\text{الطاقة} = (0.700)(0.50) \text{ kWh} = (\text{الزمن}) (\text{القدرة}) = 0.350 \text{ kWh}$$

وتكون التكلفة 3.5 cents .

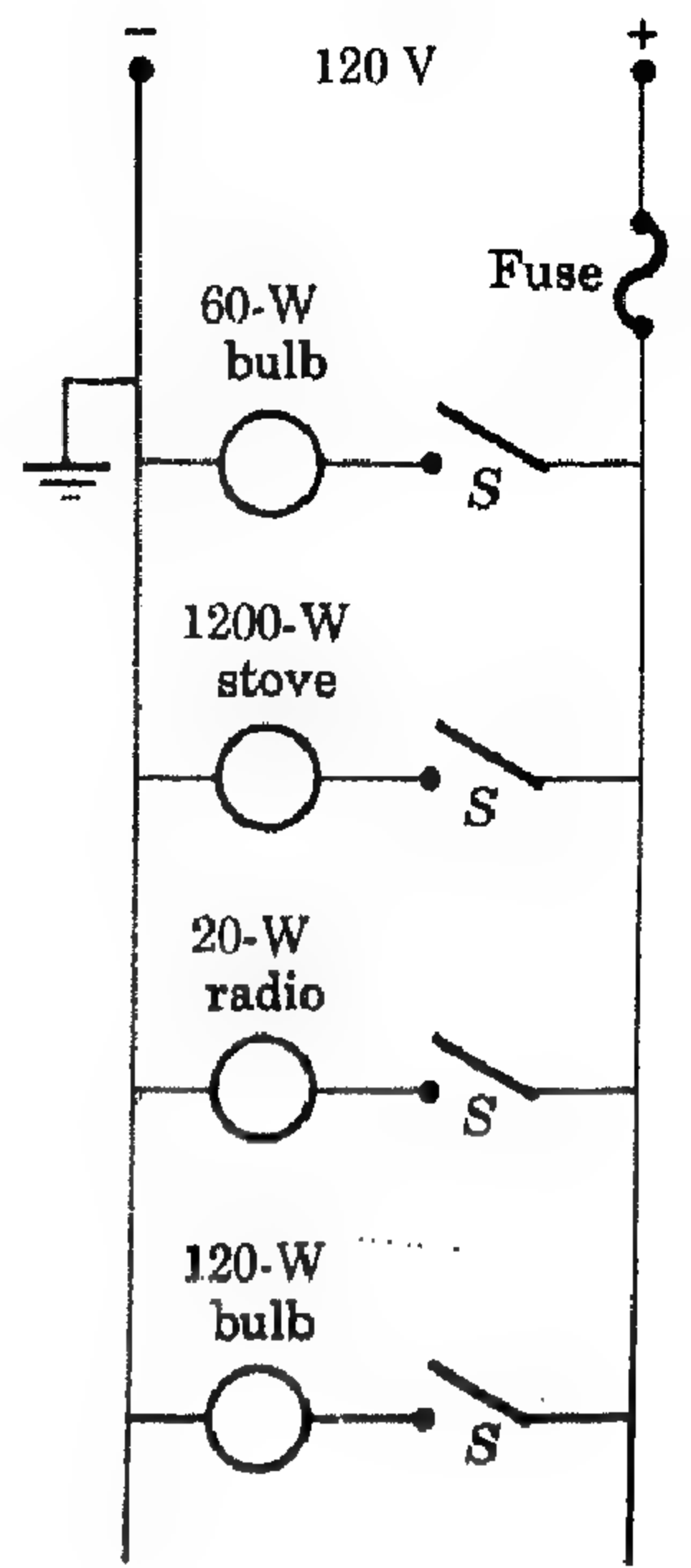
١٨ - ٧ الدوائر المنزلية

تعتبر الدوائر الكهربائية العادية التي تمتد داخل منازلنا مألوفاً لنا جميعاً . فبشركات الكهرباء تمتد على الأقل سلكين الى كل منزل لتمده بفرق جهد مقداره 120 V تقريباً . وعادة مايكون لهذه الاسلاك الواصلة الى المنازل قطر كبير حتى يمكنها أن تحمل تياراً كبيراً دون أن يحدث بها تسخين (كلما كبرت مساحة مقطع السلك ، كلما قلت المقاومة . ولما كانت الحرارة المتولدة تتناسب مع I^2R لذا فالمقاومة المنخفضة تتيح تبديداً أقل للحرارة) .

تقوم الأسلاك في المنازل الحديثة بحمل تيار يصل الى 20 A تقريباً دون حرارة مفرطة . على أنه للوقاية من التيارات الكبيرة فان مصهراً او قاطع دائرة يوصل على التوالي مع السلك ويكون الغرض منه فصل السلك عن مصدر الجهد اذا سحب تيار

أكبر من المسموح به . وتقوم هذه العملية تلقائيا بفصل أى سلك يمر فيه تيار أكبر من القدر الآمن .

تتكون دائرة المنزل النموذجية من سلكين متوازيين ممدوين خلال المنزل يحملان فرق للجهد مقداره 120 V عن طريق أسلاك الوصل . ويوضح الشكل (١٨ - ١٦) هذه الدائرة . يتصل كل مصباح للاضاءة أو جهاز منزلى ... الخ بطرف مع سلك الجهد العالى ويتصل الطرف الآخر الى سلك الجهد المنخفض . عندما يغلق مفتاح جهاز ما فان التيار يسرى خلال الجهاز من السلك + الى السلك - القادمين من محطة القوى . وعادة مايكون سلك الجهد المنخفض متصلا بالأرض . تحتوى معظم أجهزة 120 V على شعبة ثالثة فى كابس القدرة ، وتقوم هذه الشعبة بعمل وصلة بين سلك الأرض والغلاف المعدنى للجهاز . فلو لمس سلك الجهد العالى - عن طريق الصدفة - الغلاف المعدنى للجهاز فان اتصالا مباشرا يتم بالأرض . وتأثير هذا كما لو كان كل من سلك الجهد العالى والجهد المنخفض قد تلامسا معا مباشرة ، مما ينتج عنه سريان تيار ضخم خلال سلك الجهد العالى الى الأرض مما يجعل المصهر الموجود على التوالى مع سلك الجهد العالى ينصهر . ولو أن سلك الأرض لم يكن موجودا لتسبب هذا العطل فى جعل الجهاز كله « عائما » عند جهد عال بحيث يتعرض أى شخص يلمس الجهاز لصدمة كهربائية .



شكل (١٨ - ١٦)
تقوم الأجهزة المنزلية المبينة
بدور المقاومات ويمكن
تشغيل أى منها بغلق المفتاح
الخاص به

لنحسب الآن ماهو التيار الذى يسحبه مصباح 60w فى الشكل (١٨ - ١٦) عندما يضاء بغلق المفتاح الخاص به . حيث أن القدرة $VI =$ وحيث أن $P = 60w$ ، $V = 120 V$ فى هذه الحالة ، فالتنا نجد ان التيار المار خلال المصباح هو $I = 0.50 A$. أما الموقد فهو حين يدار يقوم بسحب تيار قدره 10 A ويسحب جهاز الراديو 0.167A . ويسحب المصباح 120w تيارا قدر 1.0A فاذا أدير كل الأجهزة والمصابيح معا لسحبت تيارا كليا قدره 11.667 A يمر فى المصهر . ولاتنصهر دوائر المنزل عادة لأقل من 15A ولذا فليس هناك خطر فى هذه الحالة .

يحتاج المنزل الذى يحوى عددا كبيرا من الأجهزة الكهربائية الى أكثر من دائرة . ولمعظم المنازل دوائر بها مصهرات منفصلة مثل تلك التى فى الشكل (١٨ - ١٦) . تمتد كل من هذه الدوائر ابتداء من المنبع الذى يستمد القوى من السلك الواصل وتستمر الى داخل المنزل لتدخل فى الأجزاء العديدة منه .

من الشيق ان تحسب مقاومة مصباح الاضاءة . حين يكون المصباح باردا فان مقاومته لاتكون كبيرة ولكن حين يتم توصيله بالجهد اللازم وهو عادة 120 V ، فان عنصر مقاومته يصبح ساخنا لدرجة البياض ، وكما ناقشنا فى الفصل السابع عشر تزداد مقاومته لدرجة كبيرة حين يسخن . وحين يكون ساخنا فانه يعمل حسب الواطية

(القدرة) المدونة عليه . افترض ان لدينا مصباح اضاءة مدون عليه 120V - 60w
نحن نعرف أن .

$$P = VI = \frac{V^2}{R}$$

أو

$$60 = \frac{(120)^2}{R}$$

ومن هنا

$$R = 240 \Omega$$

ويمكنك التحقق من الوحدات التي ظهرت في الاجابة .

١٨ - ٨' الأمان الكهربائي

بما أننا نستخدم الأجهزة الكهربائية يوميا ، لذا يجب علينا أن نفهم عناصر الأمان الكهربائي . والكهرباء قد تقتل الانسان بأحدى طريقتين : بأن تسبب عطبا في عضلات القلب والرئتين (أو أية أعضاء حيوية أخرى) أو أن تسبب حروقا قاتلة)

يمكن لقدر ضئيل من التيار الكهربائي أن يعطل عمل الخلية بشدة في ذلك الجزء من الجسم الذي يمر خلاله . عندما تكون قيمة التيار الكهربائي 0.001 أو أكبر فان الانسان يستطيع أن يشعر باحساس الصدمة . وعند تيارات أكبر من هذا بعشر مرات ، 0.01A فان الانسان لا يكون قادرا على ترك السلك الكهربائي من يده لأن التيار يجعل عضلات اليد تنقبض بعنف . التيارات الأكبر من 0.02A خلال جذع الانسان تصاب عضلات التنفس بالشلل ويتوقف التنفس ، ومالم يجبر التنفس الصناعي على الفور فان الضحية تختنق . ولابد أن تحرر الضحية تماما من أى مصدر للجهد قبل أن يمكن لمسها بأمان ، وإلا فان المنقذ أيضا يتعرض لخطر شديد . اذا مر تيار يبلغ 0.1A خلال منطقة القلب فانه يصدم عضلات القلب فيحدث فيها انقباضات سريعة وغير منتظمة (اختلاجات بطينية) بحيث لا يعود القلب يعمل . وفي النهاية فان تيارا مقداره 1A أو أكثر يسبب حروقا خطيرة اذا مر خلال أنسجة الجسم .

التيار الكهربائي هو أهم كمية يمكن التحكم فيها لمنع الضرر . أما الجهد فأهميته ترجع الى أنه هو الذى يسبب سريان التيار . وعلى الرغم من أن جسدا قد يشحن الى جهد أعلى بآلاف الفولتات Volts عن معدن السيارة ، حين

تنزلق ببساطة على مقعد السيارة ، الا أنك تحس بوخزة بسيطة حين تلمس مقبض الباب ، فجسديك لا يمكن أن يحتفظ بشحنات كثيرة ولذا كان التيار الذي يسرى خلال يدك الى مقبض الباب تيارا قصير العمر، ويكون الأثر الناتج على خلايا جسديك مهملا .

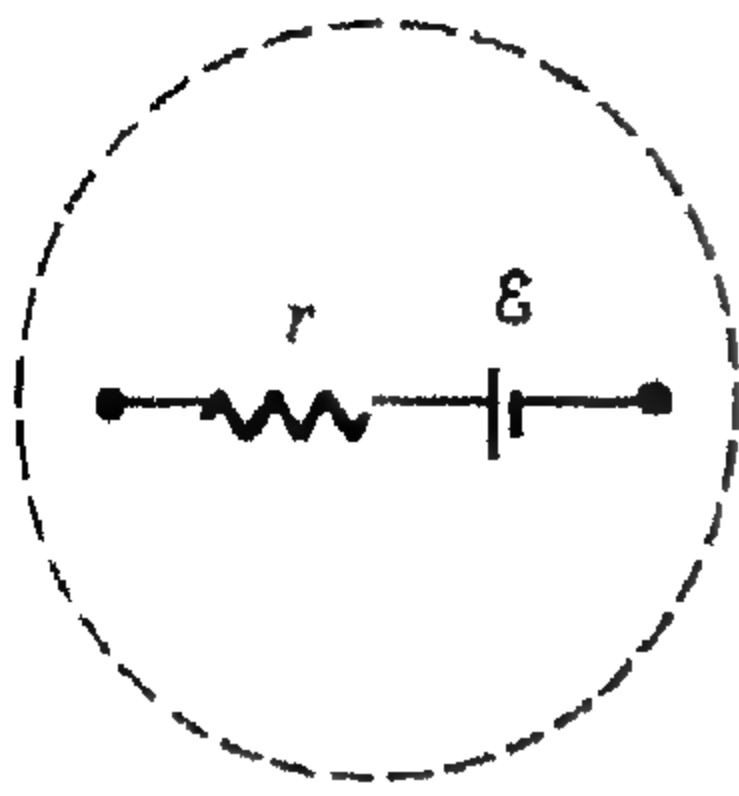
تكاد دوائر 120V المنزلية أن تكون أكيدة في احداث الوفاة في بعض الأحيان . فأحد الأسلاك في الدائرة يتصل دائما بالأرض ، ولذا يكون دائما عند نفس جهد انايب المياه في المنزل . افترض أن انسانا يرقد في حوض الاستحمام ، يتصل جسمه بطبيعة الامر بالأرض خلال المياه وأنايب المياه . فلو أن يده لمست عن طريق الصدفة سلك الجهد العالي من دائرة المنزل (عن طريق لمس سلك مكشوف في جهاز راديو او سخان مثلا) فان التيار يسرى خلال جسمه الى الأرض . ونظرا للاتصال الجيد الذي يعمل به الجسم مع الأرض فان مقاومة الجسم تكون منخفضة ، ويكون التيار الذي يسرى خلال الجسم كبيرا بدرجة تكفي لصعقه .

هناك مواقف مشابهة تحدث في ظروف أخرى . فمثلا اذا لمست بالصدفة سلكا مكشوبا أثناء وقوفك على الأرض بأقدام مبتلة فانك تكون في موقف أخطر بكثير عما لو كنت تقف على سطح جاف معزول ، لأن الدائرة الكهربائية خلال جسديك الى الأرض تكون مقاومتها كبيرة جدا لو أن اقدمك كانت جافة . وبالمثل ، لو أنك تعرضت لصدمة كهربائية نتيجة لمس سلك مكشوف او جهاز به عطب ، فان الصدمة تكون أشد لو كانت يدك الأخرى تلمس الصنبور الذي على الحوض او كانت في ماء الغسيل .

من هذه الأمثلة يتضح لك ان خطر الصدمة الكهربائية يمكن تحاشيه بتجنب مرور التيار خلال جسديك حين يكون الجهد أكثر من 50 V عليك بتجنب لمس أى جزء معدني مكشوف من الدائرة . واذا كان عليك أن تلمس سلكا ذا جهد مرتفع مثل حالة حادث خط من خطوط القدرة الكهربائية ، وحين لا تتوفر النجدة العاجلة فعليك باستعمال عصا جافة او اية قطعة من مادة عازلة لتحريكه . حين تكون في شك حول الأمان ، تجنب الاتصال او الاقتراب من اى معدن او أى أرض مبتلة . وفوق كل هذا لاتدع جسديك يصبح هو حلقة الاتصال بين نقطتين بينهما فرق شاسع في الجهد .

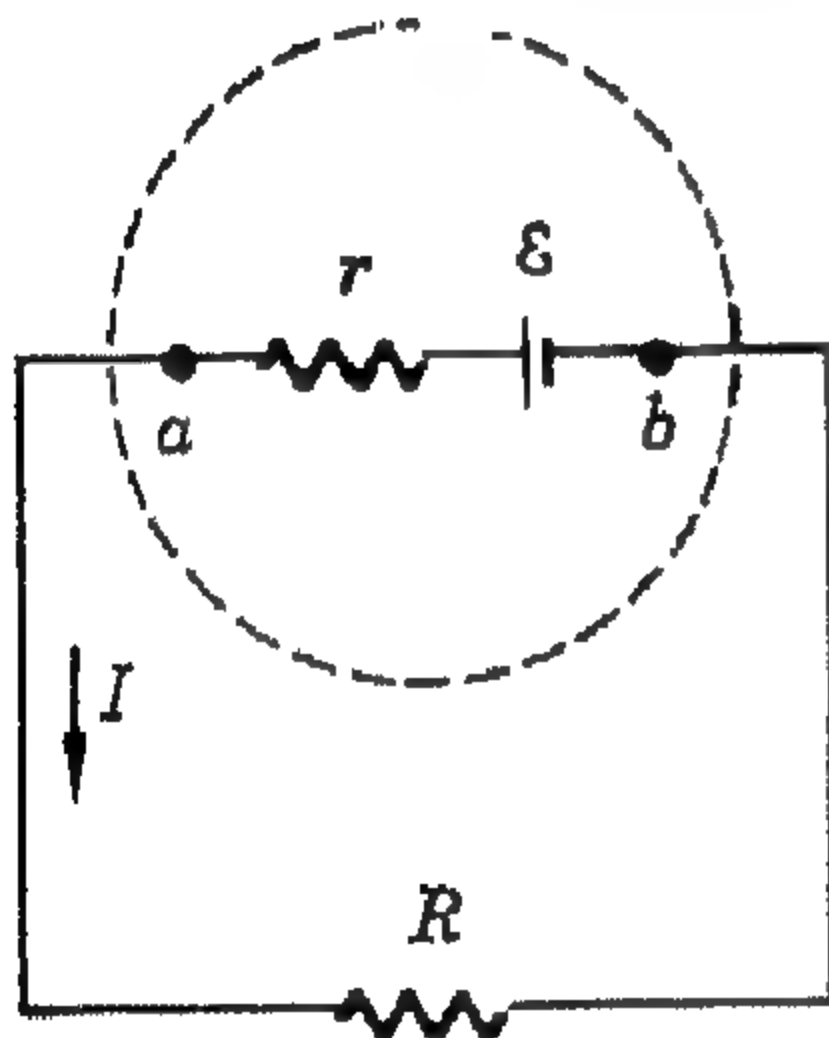
١٨ - ٩ ق . د . ك والجهد الطرفى للبطارية

من المحتمل أن كل إنسان قد لاحظ في وقت أو آخر أن أنوار السيارة تخفت قليلا عندما يبدأ المحرك في الدوران ، ويرجع السبب الى أن مبدىء الحركة الكهربائى في



بطارية

شكل (١٧ - ١٨)
تعمل البطارية كما لو كانت
مكونة من ق . د . ك صافية
متصلة على التوالي مع مقاوم
كما هو مبين



شكل (١٨ - ١٨)
الجهد الطرفي V للبطارية
هو $\varepsilon - Ir$

السيارة يقوم بسحب كمية كبيرة من التيار من البطارية . وهو بهذا يخفض الجهد بين طرفي البطارية فتخفت اضواء السيارة . سنبحث الآن عدم الثبات في فرق الجهد الطرفي للبطارية .

تتولد القوة الدافعة الكهربائية للبطارية من التفاعلات الكيميائية بداخلها كما أشير الى ذلك في الفصل السابق . وحين لايسحب أى تيار من البطارية فان فرق الجهد بين طرفيها يكون مساويا لقوتها الدافعة الكهربائية .
ولكن البطارية تعتبر أداة كيميائية معقدة وتتصرف فعلا كقوة دافعة كهربائية (ق . د . ك) متصلة على التوالي مع مقاوم . ويوضح الشكل (١٨ - ١٧) الدائرة المكافئة للبطارية .

نلاحظ أنه حين لايسحب تيار من البطارية ، فإنه لا يوجد فرق للجهد عبر المقاومة الداخلية للبطارية ، ومن ثم يكون فرق الجهد بين طرفي البطارية مساويا للقوة الدافعة الكهربائية ، ولكن إذا كانت البطارية متصلة عبر مقاوم كما هو في الشكل (١٨ - ١٨) فان تيارا I يسرى ويجعل فرق الجهد الطرفي مساويا $\varepsilon - Ir$

في حالة بطاريه 12 V جيدة ، تكون المقاومة الداخلية في حدود $0.01\ \Omega$ فقط ، فإذا كانت البطارية متصلة عبر مقاوم $3\text{-}\Omega$ فإنه يكون لدينا

$$I = \frac{12}{3 + 0.01} \approx 4\text{ A}$$

ويكون فرق الجهد الطرفي هو عبارة عن فرق الجهد بين النقطتين a ، b وهو

$$\text{الجهد الطرفي} = 12 - (4)(0.01) = 11.96\text{ V}$$

في هذه الحالة يكون الجهد الطرفي مساويا تقريبا للقوة الدافعة الكهربائية

ولكن حين يتقدم العمر بالبطارية تزداد مقاومتها ، فلو كانت مقاومة البطارية في الشكل (١٨ - ١٨) $1.0\ \Omega$ لكان التيار هو :

$$I = \frac{12}{4} = 3.0\text{ A}$$

أما الجهد الطرفي فيكون

$$\text{الجهد الطرفي} = 12 - 3.0 = 9.0\text{ V}$$

يجب ان يكون واضحا انه عندما يقوم مبدىء الحركة في السيارة بسحب 100 A من البطارية فان فرق الجهد الطرفي حتى لبطارية جديدة ينخفض بشكل ملحوظ .

مثال توضيحي ١٨ - ١١ : ماهو الجهد الطرفي لكل من البطارتين في الشكل (١٨ - ١٩) ؟

طريقة الحل : حيث ان البطارتين متضادتان لذا فالقوة الدافعة الكهربائية المؤثرة في الدائرة هي 18 V ويسرى التيار في الاتجاه المين وتكون قيمته هي

$$I = \frac{18}{9} = 2 \text{ A}$$

فرق الجهد بين النقطتين d الى c هو

$$V = -0.2 + 24 = 23.8 \text{ V}$$

ومن ثم فالجهد الطرفي للبطارية 24 V يكون أقل من ق . د . ك لها . بالنسبة للجهد الطرفي للبطارية الأخرى من b الى a نجد أن

$$V = +1.8 + 6 = 7.8 \text{ V}$$

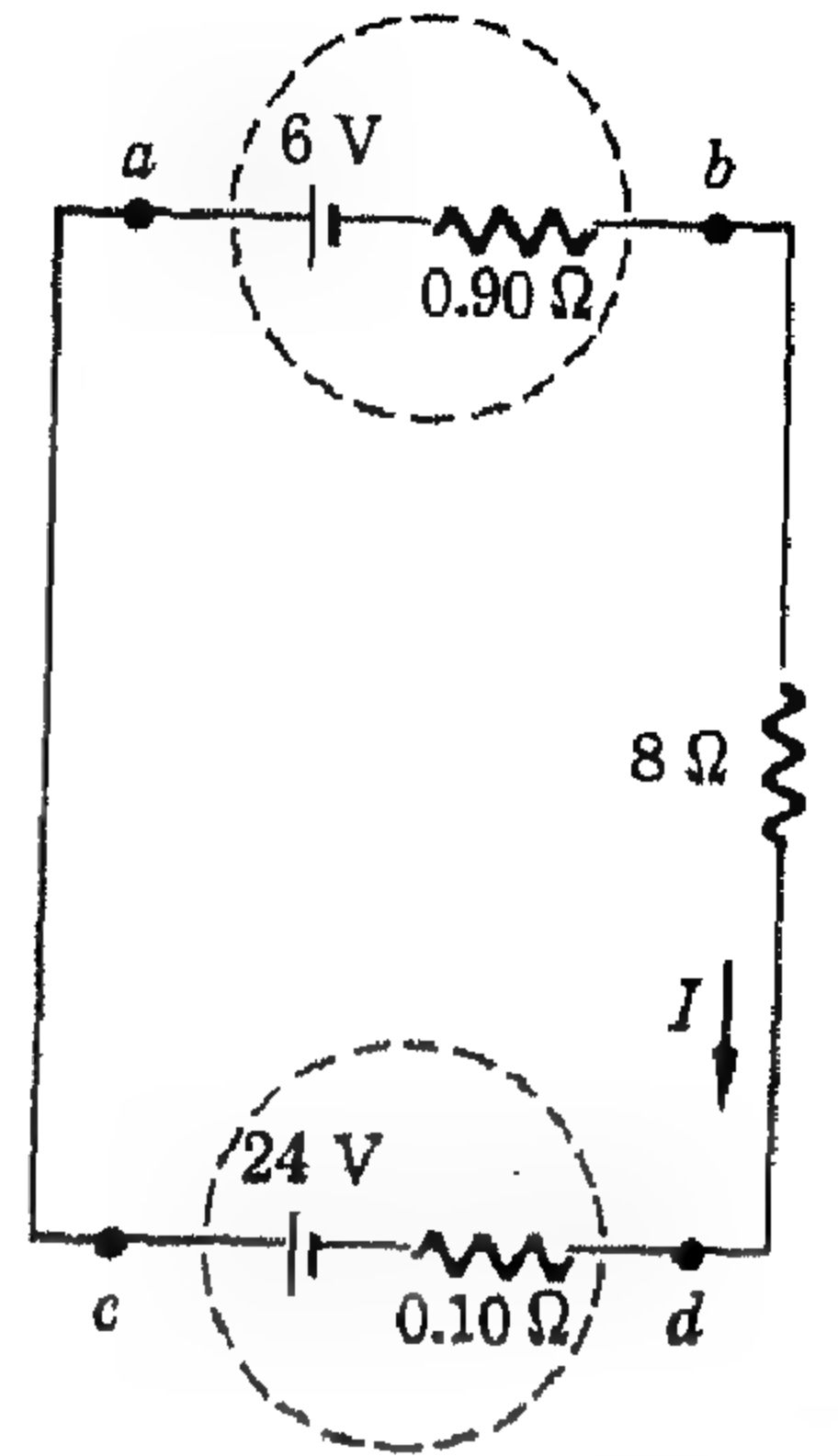
نلاحظ ان الجهد الطرفي لهذه البطارية أكبر من ق . د . ك لها . ويكون الوضع عادة هكذا عندما تكون البطارية تحت الشحن مثل البطارية 6V في المثال .

١٨ - ١٠ مقياس الجهد

إذا أردنا أن نقيس فرق الجهد بين نقطتين في دائرة ما ، فانه يكون من المهم أحيانا ألا يسحب جهاز قياس الجهد أى تيار ، كما في محاولة قياس ق . د . ك لبطارية ذات مقاومة داخلية كبيرة . أو افترض أننا نريد قياس فرق الجهد بين نقطتين على جسم انسان مثلما يحدث عند قياس موجات المخ . يقوم الجسم هنا بدور البطارية ذات المقاومة الداخلية الكبيرة . من الواضح انه لا تيار يمكن أن يسحب أثناء القياس إذا كان المراد قياس ق . د . ك . مستقرة .

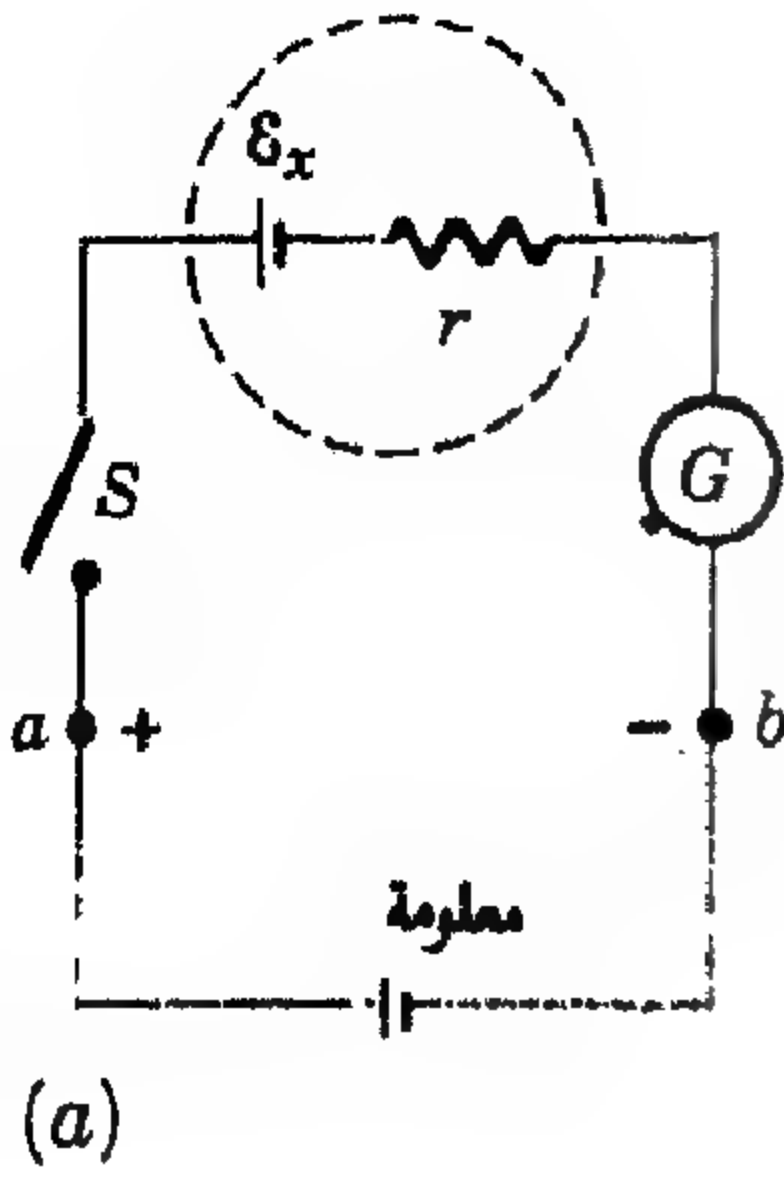
يقوم أى فولتميتر بسحب قليل من التيار من النقط التي يوصل اليها ، وعلى الرغم من أن الفولتمترات الالكترونية تسحب قدرا ضئيلا جدا من التيار من مصدر الجهد الذي تقوم بقياسه ، الا أن الفولتمترات العملية لها دائما مقاومة تبلغ عدة مئات من الأومات ohms وعلى ذلك ، عند توصيلها عبر جهد يبلغ عدة Volts فانها تسحب تيارا ملحوظا ، لذا فاننا نحتاج الى جهاز بسيط لقياس الجهد بحيث لايقوم بسحب اية تيارات أثناء القياس ، وهذا الجهاز هو مقياس الجهد .

افترض انك تريد قياس بطارية مجهولة لها ق . د . ك ٤ . لو انك تستطيع إيجاد مجموعة كبيرة من البطاريات المعيرة ، لأمكنك توصيل كل من هذه البطاريات



شكل (١٨ - ١٩)

تقوم البطارية 24 V بشحن البطارية 6V ونجد ان الجهد الطرفي للبطارية التي تفرغ اقل من قوتها الدافعة الكهربائية بينما العكس هو الصحيح بالنسبة للبطارية التي تشحن



المعلومة في دائرة كالتى في شكل (١٨ - ٢٠) ويمكنك حينئذ ضغط المفتاح برفق حتى ترى ان الجلفانومتر سينحرف أم لا . وحين تصل الى بطارية لاينحرف معها الجلفانومتر فان معنى ذلك أن ق . د . ك للبطارتين قد وزنت احدهما الاخرى بحيث لا يمر تيار قط ، ومن ثم يمكننا معرفة ان البطارية المجهولة لها نفس ق . د . ك كالبطارية المعلومة . حيث أن القياسات قد تمت حين لم يكن هناك تيار مسحوب من البطارية المجهولة لذا فالمقاومة الداخلية للبطارية لاتأثير لها .

ليس من العملي استخدام عدد كبير من البطاريات المعلومة لانها لن تكون متاحة عادة . ولكن الدائرة المرسومة في الشكل (١٨ - ٢٠ ب) تخدم نفس الغرض ولا تحتاج - كما سنرى - الا الى بطارية قياسية واحدة ، ويقوم الانسان بمجرد تحريك الوصلة المنزلقة عند B على طول المقاوم المتغير حتى يصير فرق الجهد من A الى B مساويا للكمية ϵ_x (يشار الى جزء الدائرة الموجود تحت النقطتين a و b بأنه مجزء الجهد) . وعندما يكون فرق الجهد من A الى B يساوى بالضبط ϵ_x فانه لن يمر تيار في الدائرة العليا ويكون لدينا :

$$\epsilon_x = I_0 R_x$$

لو أن ϵ_x استبدل بها الآن بطارية قياسية معلومة ϵ_s فان مقياس الجهد يستطيع مرة أخرى ان يترن بحيث لاينحرف الجلفانومتر . وعندئذ .

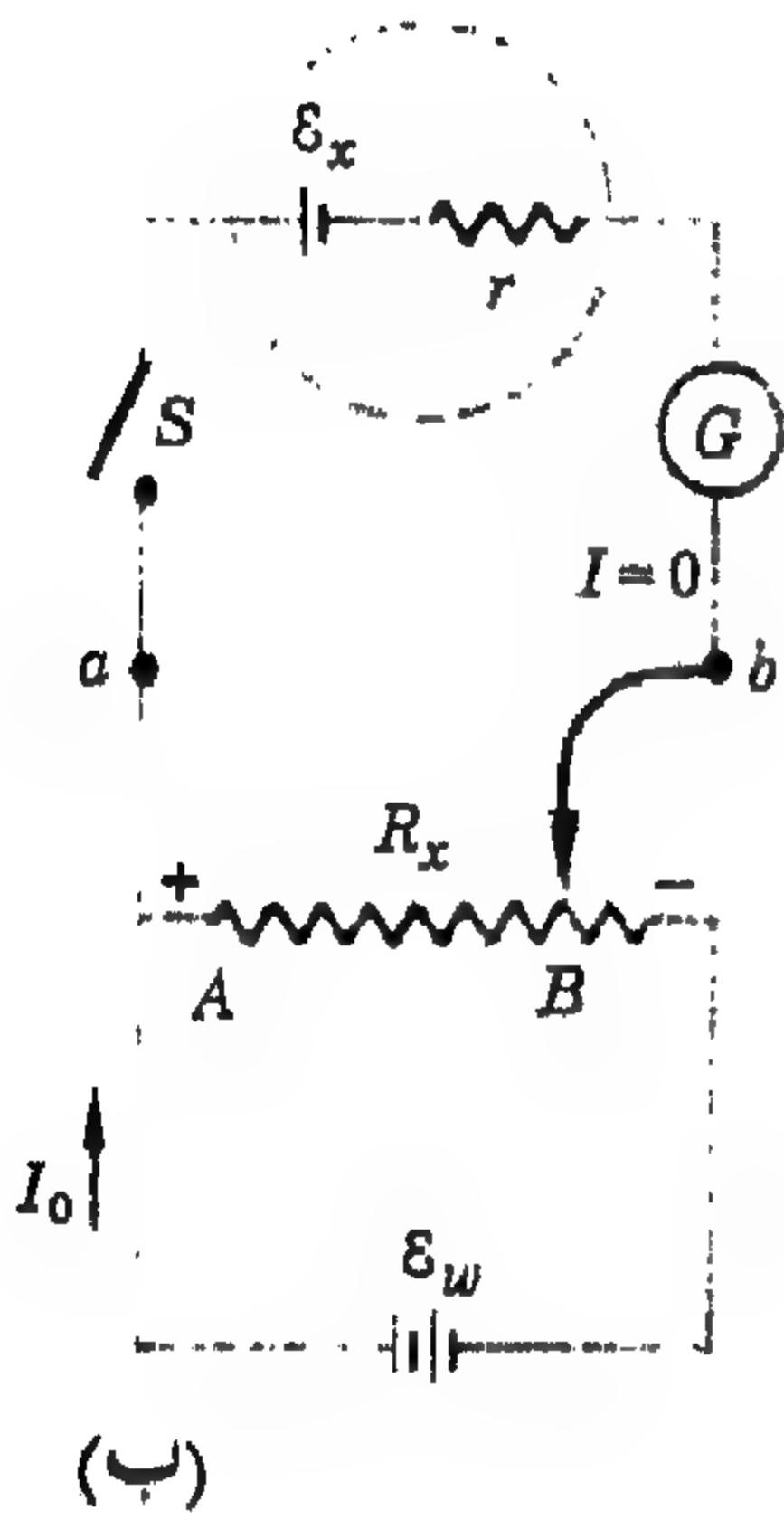
$$\epsilon_s = I_0 R_s$$

بقسمة هاتين المعادلتين نجد أن

$$\frac{\epsilon_x}{\epsilon_s} = \frac{R_x}{R_s}$$

عمليا ، يتم معايرة المقاوم بحيث تكون $\frac{R_x}{R_s}$ معلومة ، ومعرفة قيمة الخلية القياسية ϵ_s ، يمكن بسهولة حساب قيمة ق . د . ك المجهولة . (من الشائع أن يكون المقاوم مجرد سلك مقاومه طويل ومنتظم بحيث تكون R متناسبة مع طول السلك من A الى B ، وتكون النسبة $\frac{R_x}{R_s}$ هي نفسها النسبة بين الأطوال المناظرة $\frac{L_x}{L_s}$ للسلك .)

مثال توضيحي ١٨ - ١٢ : حين توضع وصلات كهربائية عند مواقع مختلفة على رأس شخص ما ، فانه تلاحظ فروق للجهد ذات طابع متذبذب . وهذه الفروق في الجهد يمكن تسجيلها بواسطة جهاز رسم المخ . وتبلغ القيمة النموذجية لهذه الفروق في الجهد ما قيمته $5 \times 10^{-4} V$ ويكون تذبذبها بمعدل يصل الى 0.10 s افترض ان مقاومة الرأس بين نقطتين من هذه الوصلات تبلغ $10,000 \Omega$. ماهو التيار الذى يمكن



شكل (١٨ - ٢٠)

في الجزء (أ) حين لا يمر تيار
الناء اغلاق S فمعنى هذا ان

$$\epsilon_x = \epsilon_{\text{known}}$$

للحصول على ϵ_{known}

متغيرة فاننا نستخدم الدائرة

المرسومة تحت a ، b في

الجزء (ب) . التيار خلال G

يكون صفرا عندما يكون فرق

الجهد من A الى B مساويا

ϵ_x . وتقوم هذه الأداة ،

مقياس الجهد ، بقياس ق .

د . ك خلية مجهولة

لجهاز تسجيل الجهد سحبه من المصدر المراد قياسه اذا كانت قراءة الجهد بها خطأ أقل من ١ في المائة ، وكم هى مقاومة جهاز التسجيل ؟

طريقة الحل : يقوم ذلك الجزء من رأس الشخص والمحصور بين القطبين بدور بطارية لها ق د ك V_0 ومقاومها الداخلية $10,000 \Omega$ حينما يسحب تيار مقداره I فان المقاومة الداخلية تسبب خطأ فى الجهد مقداره $10,000I$ ولكننا نريد أن يكون :

$$\frac{10,000I}{V_0} < 0.01$$

وعلى ذلك لا يستطيع جهاز التسجيل ان يسحب تيارا يزيد على $\frac{0.01 V_0}{10,000}$ أو $10^{-6} A$

ولما كان التيار حين يسرى خلال مسجل الجهد وذلك بواسطة مصدر الجهد الذى قيمته V_0 فاننا نستطيع باستخدام قانون أوم ان نوجد المقاومة R_0 لجهاز التسجيل .
اى أن

$$V = IR$$

وتصبح

$$V_0 = (10^{-6} V_0) R_0$$

ومنها تكون مقاومة جهاز التسجيل على الأقل .

$$R_0 = 10^6 \Omega$$

وكثير من أجهزة التسجيل الحديثة تستعمل مبدأ مقياس الجهد ، ولها فى الواقع مقاومة لانهاية أثناء اجراء القياسات .

ملخص

تنص قاعدة النقطة لكيرتشف على أن مجموع التيارات الداخلة الى نقطة ما يجب أن يساوى مجموع كل التيارات الخارجة من نفس النقطة . أما قاعدة العروة فتتنص على أن المجموع الجبرى لتغيرات الجهد حول دائرة مغلقة (أو عروة) يجب أن يكون صفرا .

تجمع المقاومات المتصلة على التوالى مباشرة أما المقاومات التى على التوازي فتجمع مقلوباتها .

تجمع المكثفات المتصلة على التوازي مباشرة أما المكثفات التى على التوالى فتجمع مقلوباتها . عندما يسرى تيار I خلال مقاومة R فان القدرة المستهلكة فى المقاوم تكون $I^2 R$. وتظهر هذه الطاقة على هيئة طاقة حرارية . اذا مر تيار I خلال فرق للجهد V من أى نوع فان القدرة المستهلكة بواسطة هذا التيار تكون VI .

تتلخص قاعدة الأمان الابتدائية والتي يجب اتباعها عند تناول الكهرباء فيما يلي : لاتدع جسدك يصبح حلقة الوصل بين نقطتين بينهما فرق شاسع للجهد مطلقا .

تعمل البطارية مثل ق . د . ك ع متصلة على التوالي مع مقاومة داخلية r ، ويكون فرق الجهد الطرفى للبطارية مختلفا عن \mathcal{E} بكمية قدرها Ir ، حيث I هو التيار خلال البطارية .

يقيس مقياس الجهد الجهود بدون سحب تيار ، ونتيجة لهذا يمكن استعماله لقياس ق . د . ك لمصادر تحتوى على مقاومة داخلية محسومة .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

- ١ - أن تذكر قاعدة النقطة لكيرتشوف وأن تعطى أمثلة على تطبيقاتها .
- ٢ - أن تذكر قاعدة العروة لكيرتشوف وتكتب معادلة العروة لدائرة على التوالي تحوى بطاريات ومقاومات .
- ٣ - أن تختصر مجموعة معينة من المقاومات المتصلة على التوالي والتوازي لتصير مقاروما مكافئا واحدا .
- ٤ - أن تختصر مجموعة معينة من المكثفات المتصلة على التوالي والتوازي لتصير مكثفا مكافئا واحدا .
- ٥ - أن تحل دوائر التيار المستمر التى تحوى بطاريات ، مقاومات ومكثفات مستعملا قواعد كيرتشوف .
- ٦ - أن تستخدم معادلة القدرة ، $P = VI$ لكى توجد القدرة المفقودة أو المكتسبة فى مقاوم ، وبطارية ومكثف تحت ظروف التيار المستمر .
- ٧ - أن ترسم دائرة منزلية نموذجية وأن تشير الى العناصر المختلفة فيها . أن تحسب التيار المسحوب فى كل جزء من الدائرة حين تعلم الاجهزة المستخدمة والتي تستمد من هذه الدائرة طاقتها .
- ٨ - أن تحلل موقفا عمليا من وجهة نظر الأمان .
- ٩ - أن تشرح لماذا لا يكون الجهد الطرفى للبطارية مساويا دائما لقيمة ق . د . ك للبطارية . ان توجد الجهد الطرفى اذا علمت قيم كل من \mathcal{E} ، r .
- ١٠ - أن ترسم دائرة مقياس الجهد وأن تشرح وظيفة هذا الجهاز .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

قاعدة النقطة لكيرتشوف .

قاعدة العروة لكيرتشوف .

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots$$

$$P = VI \quad C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots \quad \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

ق . د . ك . فى مقابل الجهد الطرفى لبطارية .

لاتصبح أبدا حلقة الاتصال

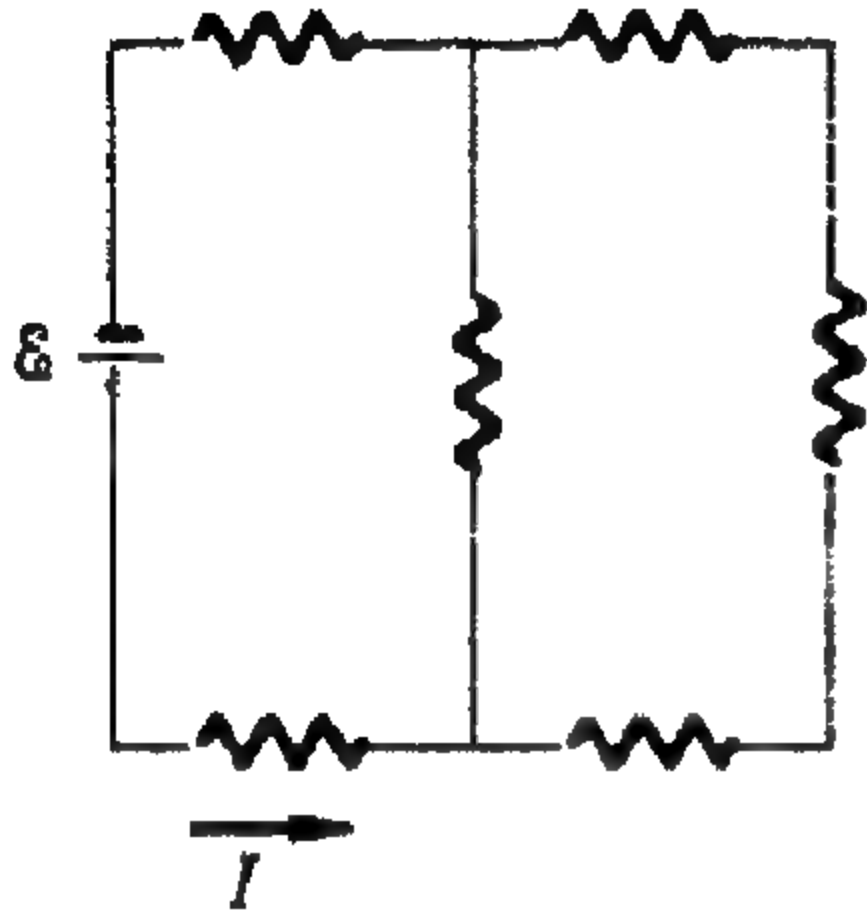
أسئلة وتخمينات

- ١ - مقاوم متصل بين نقطتي a و b كيف يمكن معرفة تغير الجهد من a الى b وهل هو ارتفاع أم انخفاض ، كرر بالنسبة لبطارية وبالنسبة لمكثف .
- ٢ - اشرح النص التالي : للمقاومات التي على التوالي يكون المقاوم المكافئ دائما أكبر من أكبرها ، والتي على التوازي يكون المقاوم المكافئ أصغر من أصغرها . ماهو النص المقابل في حالة المكثفات ؟
- ٣ - لماذا يقوم الانسان بتوصيل بطاريتين على التوالي ؟ أو على التوازي ؟
- ٤ - لا يجب أبدا توصيل بطاريتين على التوازي مالم تكونا متطابقتين تقريبا . لماذا ؟
- ٥ - هل تكون الطاقة المخزنة في ثلاثة مكثفات متطابقة ومشحونة من بطارية 12 V أكبر مايمكن حين تتصلل المكثفات على التوالي أم على التوازي ؟
- ٦ - هل تعتمد الطاقة المخزنة في مكثفات ثلاثة متصلة على التوالي على أيها يقع في المنتصف ؟ اشرح .
- ٧ - اشرح لماذا تكون الشحنات متطابقة على مكثفات مختلفة متعددة شحنت وهي على التوالي بينما تكون الشحنات متباينة على مكثفات مختلفة متصلة على التوازي .
- ٨ - عندما يقبض انسان على سلكين متصلين بلوحى مكثف مشحون فانه يشعر بصدمة . ويكون الاثر أشد في حالة مكثف $2\text{-}\mu\text{F}$ عنه في حالة $0.02\text{-}\mu\text{F}$ على الرغم من أن كليهما شحنت الى نفس الفرق في الجهد . لماذا ؟
- ٩ - تقف الطيور دائما على أسلاك الضغط العالي . لماذا لاتصعق هذه الطيور علما بأن الأسلاك قد يكون بها ثغرات ليس عليها عازل ؟
- ١٠ - اذا سرى تيار لايتجاوز كسرا صغيرا من الأمبير ampere خلال احدى اليدين ومر من اليد الاخرى فان الانسان قد يصعق . اما اذا مر التيار من احدى اليدين وخرج من المرفق الذى يعلو اليد فان الانسان يمكنه أن يظل حيا حتى لو كان التيار من الكبر بحيث يحرق اللحم . اشرح .
- ١١ - تقلق الأمهات دائما حين يلهو الأطفال بالقرب من مخارج الكهرباء . اشرح العوامل المختلفة التى تحدد الى أى مدى يبلغ سوء الصدمة التى يتعرض لها الطفل . ماذا يحدث لو أن طفلا صغيرا قام بقطع سلك مصباح كهربائى الى قسمين مستخدما زردية لقطع اسلاك غير معزولة وذلك حين كان السلك متصلا بمصدر الكهرباء ؟ هل يكون الطفل معرضا لأى خطر في هذه الحالة ؟
- ١٢ - أن تلمس سلكا مكشوبا من دائرة الانارة المنزلية حين تكون واقفا في طابق تحت مستوى الأرض (بدروم) رطب ، أشد خطرا عما اذا كنت واقفا في الطابق الثانى . لماذا ؟
- ١٣ - من أشد الأشياء خطورة أن تستعمل راديو كهربائيا بالقرب من حوض الاستحمام أثناء الاستحمام . لماذا ؟ هل ينطبق نفس الشيء على جهاز راديو يعمل بالبطارية ؟
- ١٤ - في بعض الأغراض مثل رسم القلب ، اختبار تلف المخ ، كشف الكذب ، ... الخ فاننا نقيس فرق الجهد بين أجزاء مختلفة من جسم الانسان . لما لا يستخدم فؤتمتر عادى لهذه الأغراض ؟ ماهى الاحتياطات الواجب اتخاذها ؟
- ١٥ - تحول منتجوا السيارات من استخدام النظام الكهربائى 6V الى 12 V وذلك منذ زمن ليس بالبعيد . لماذا ؟
- ١٦ - قدر استهلاك القدرة الكهربائية لمدينة قرية . ماهو التيار الذى يجب مد المدينة به عند جهد يبلغ 220V لتحصل المدينة على هذه الطاقة ؟ اشرح لماذا كان استخدام محولات القدرة ذات الجهد العالى جدا مفيدا (أى 10^5 V)

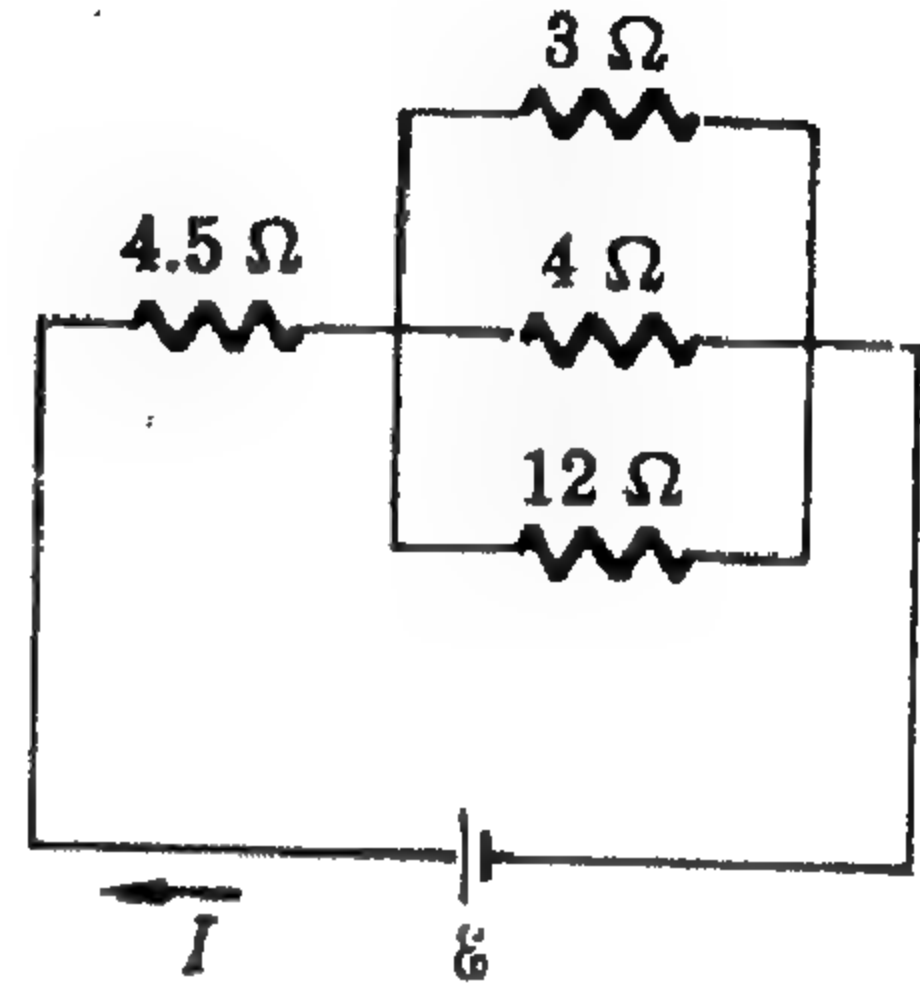
مسائل :

اهمل المقاومة الداخلية للبطاريات في حالة عدم النص عليها في المسائل .

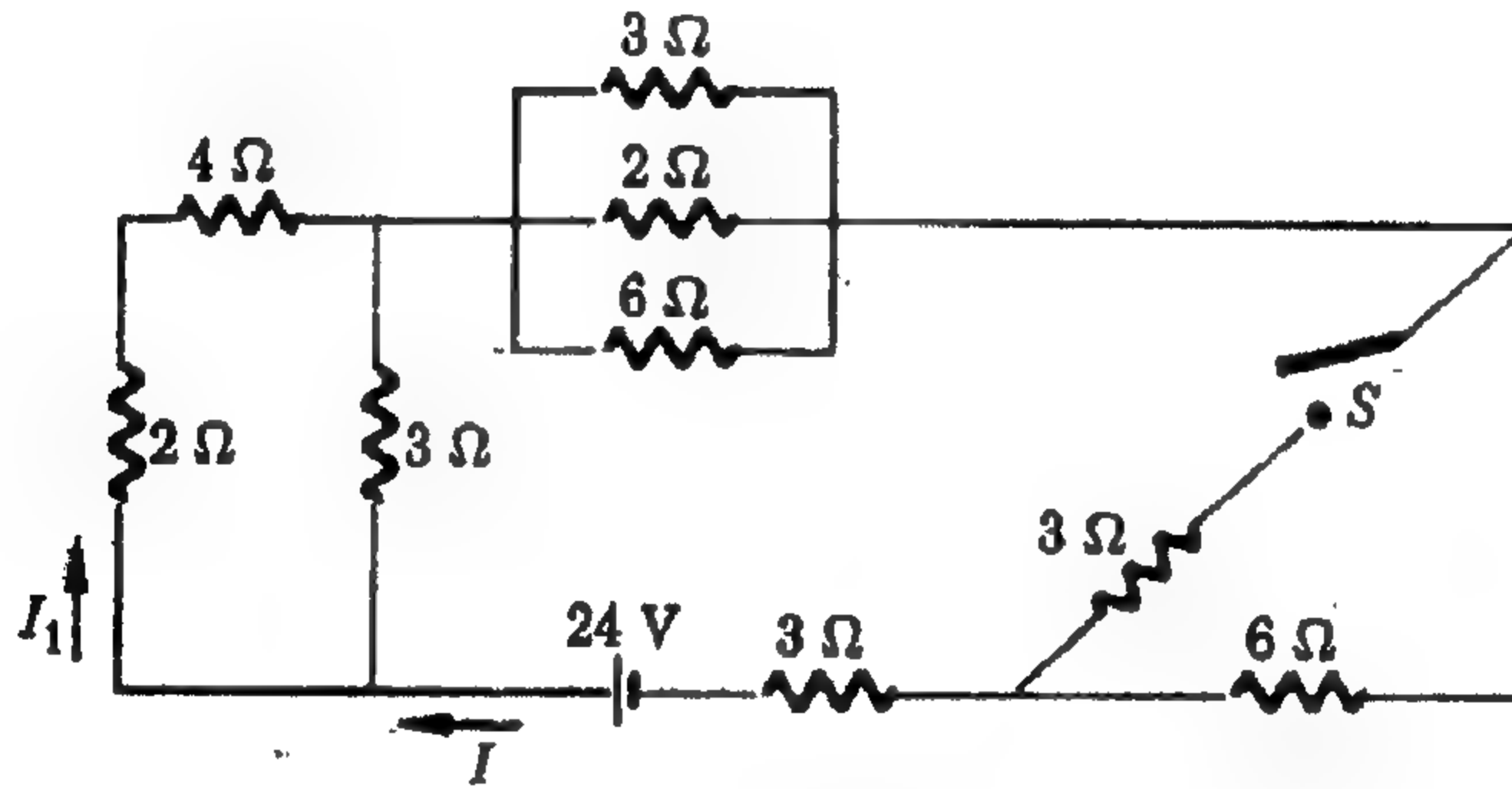
- ١ - (أ) اوجد المقاومة المكافئة للدائرة المرسومة في الشكل (أ) ١٨ - ١ . (ب) اوجد I إذا كانت \mathcal{E} تساوى 12. V .
- ٢ - في الشكل م ١٨ - ٢ إذا كانت قيمة \mathcal{E} هي 12.0 V وكان كل مقاوم يساوى 2.0 n فما هي المقاومة المكافئة ؟ وما هو التيار
- ٣ - اوجد المقاومة المكافئة للدائرة المرسومة في الشكل م ١٨ - ٣ عندما (أ) يكون المفتاح S مفتوحا و (ب) عندما يكون S مغلقا
- ٤ - اوجد المقاومة المكافئة للدائرة المرسومة في الشكل م ١٨ - ٤ إذا كان كل مقاوم يساوى 4Ω
- ٥ - تبلغ قيمة كل مكثف في شكل م ١٨ - ٥ $2.0 \mu F$ اوجد السعة المكافئة للمجموعة .



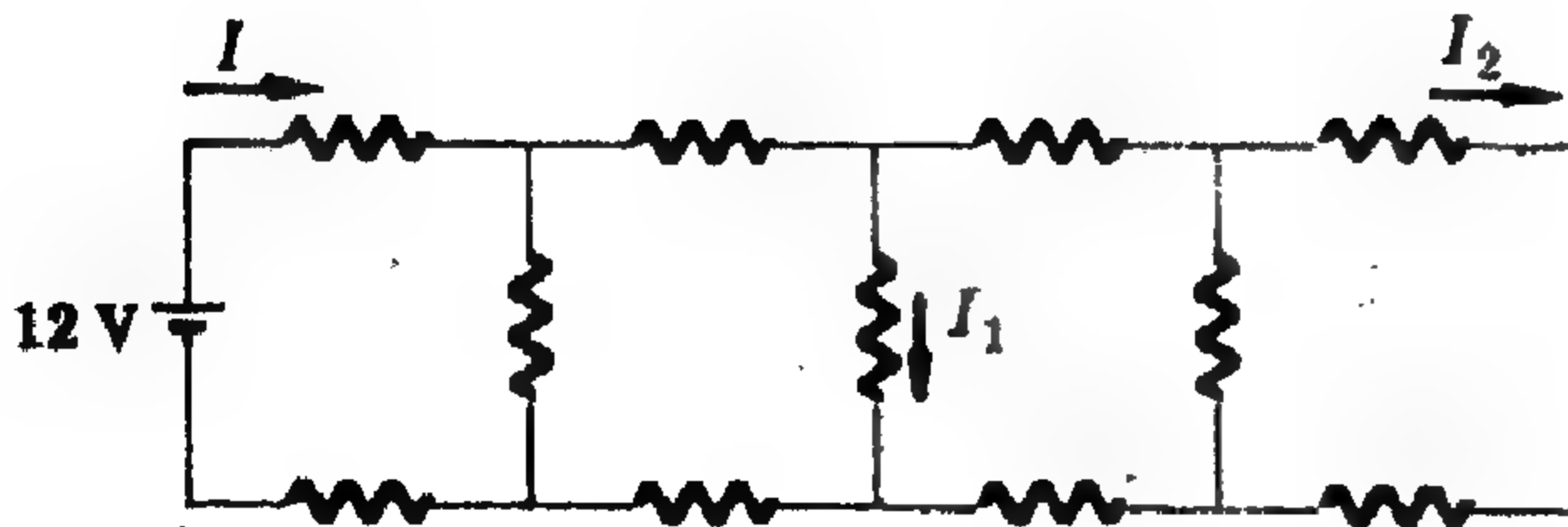
شكل م ١٨ - ٢



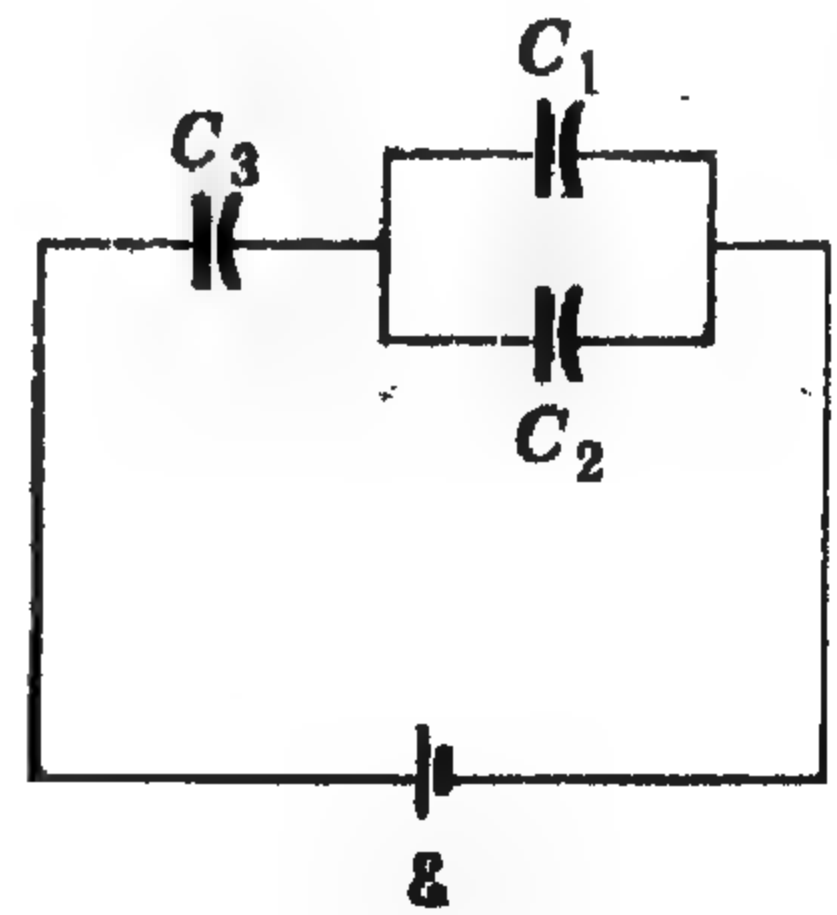
شكل م ١٨ - ١



شكل م ١٨ - ٣



شكل م ١٨ - ٤



شكل م ١٨ - ٥

٦ - أوجد السعة المكافئة للمجموعة المرسومة في شكل م ١٨ - ٦ .

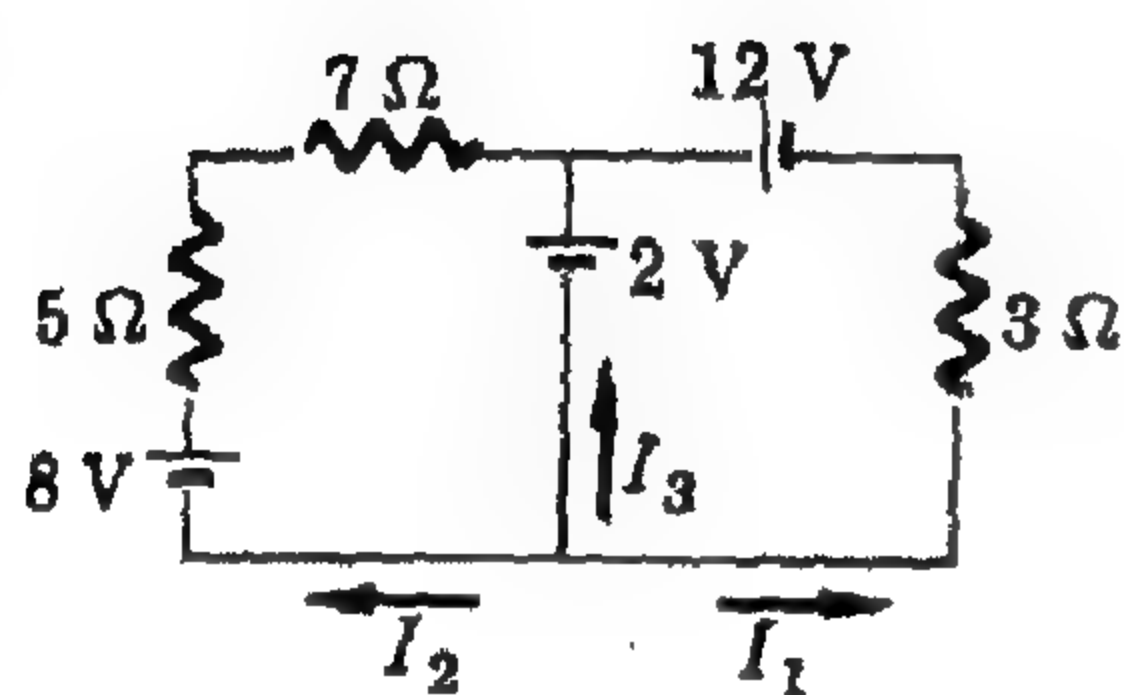
٧ - أوجد I_1 ، I_2 ، I_3 في الدائرة التي في الشكل م ١٨ - ٧ .

٨ - يقرأ الأمبير في الشكل م ١٨ - ٨ 5 A أوجد I_1 ، I_2 ، \mathcal{E} وقراءة الفولتميتر .

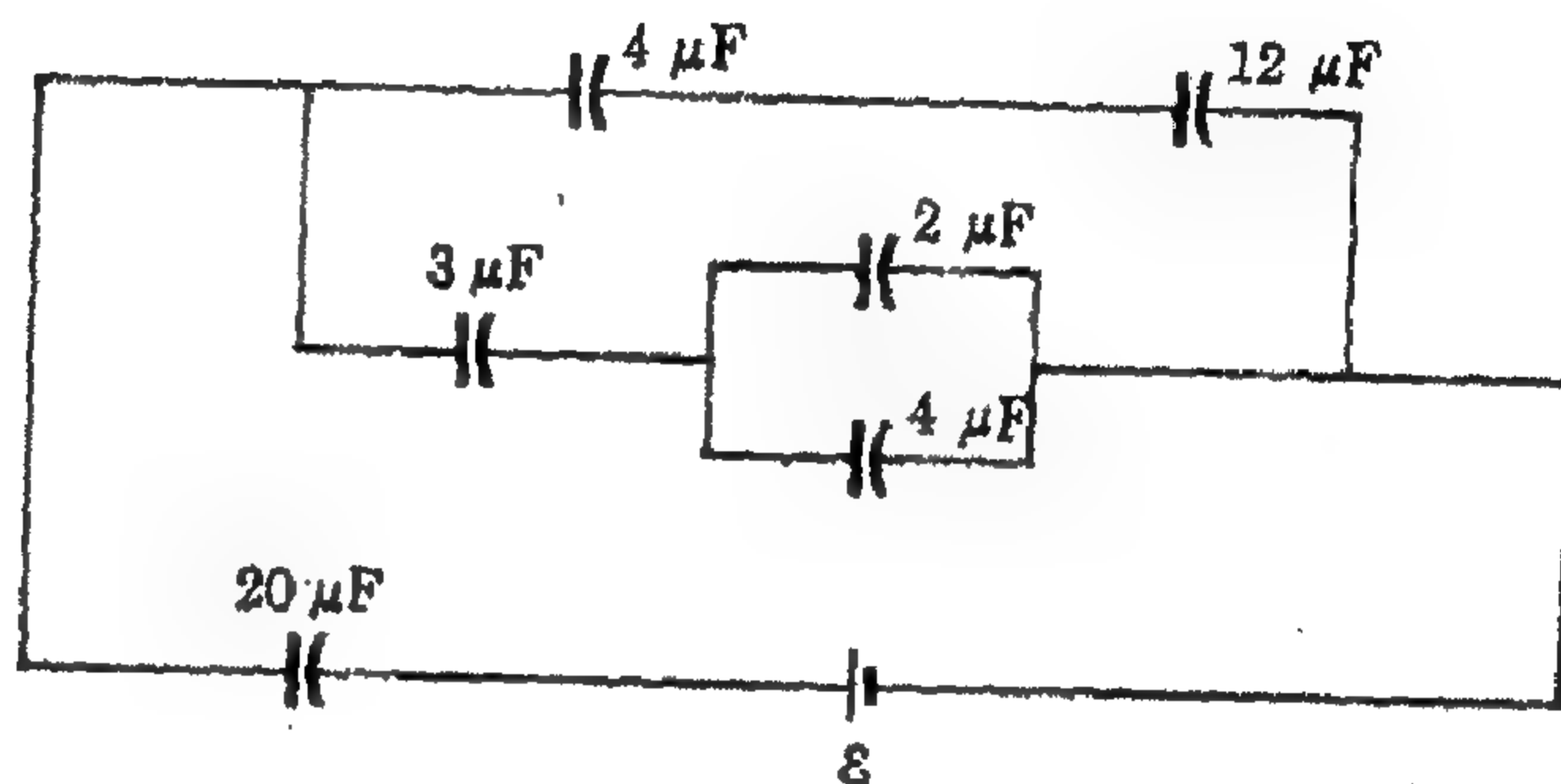
*٩ - أوجد التيارين I ، I_1 وكذا الشحنة الموجودة على المكثف $7\text{-}\mu\text{F}$ في الدائرة التي في شكل م ١٨ - ٩ .

تلميح : لاحظ ان التيارات في العديد من الاسلاك قيمتها صفر .

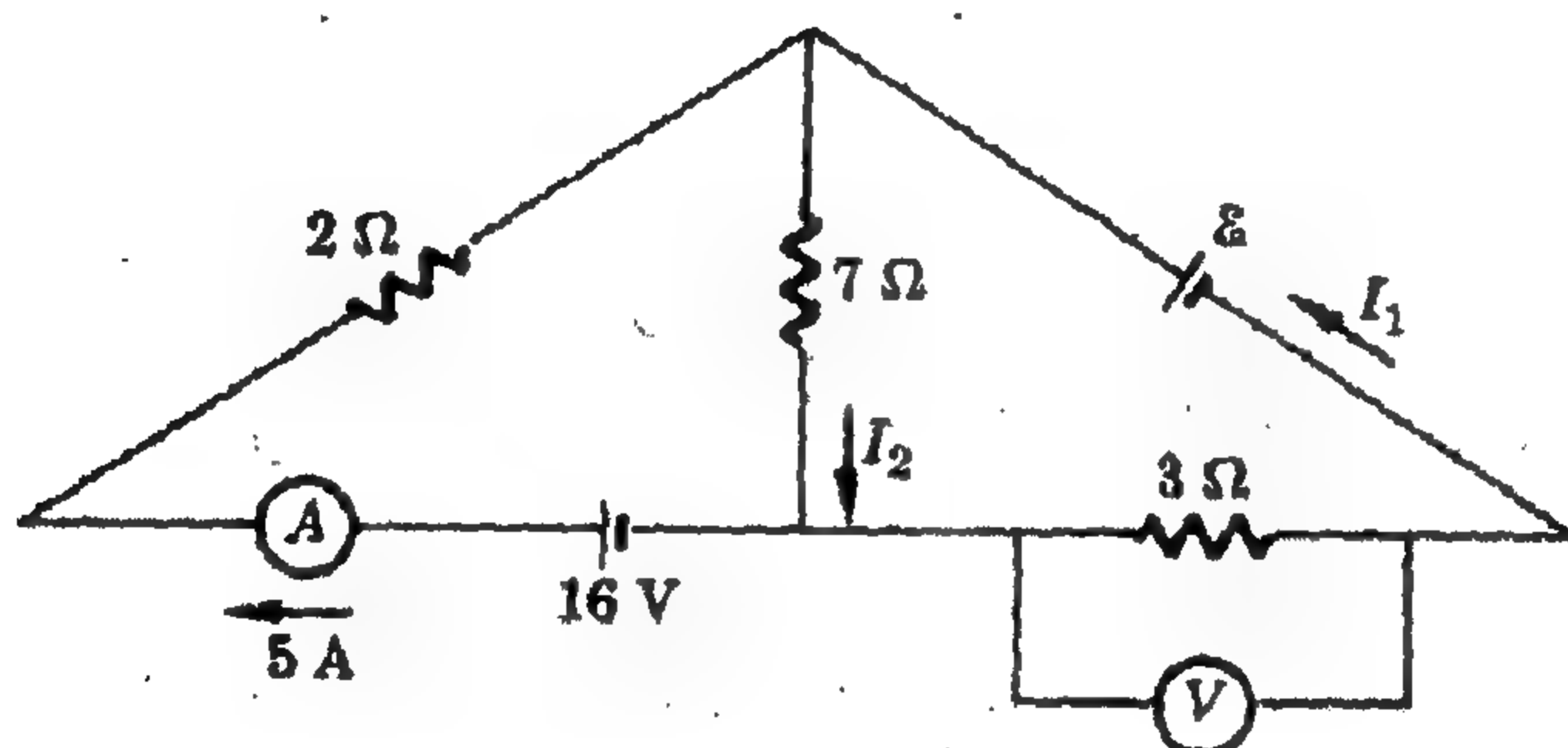
١٠ - بالنسبة للدائرة الموضحة في الشكل م (١٨ - ١٠) أوجد : (أ) التيار المار خلال البطارية ، (ب) التيار خلال المقاوم $12\text{-}\Omega$ ، (ج) الطاقة المفقودة في المقاوم $8\text{-}\Omega$.



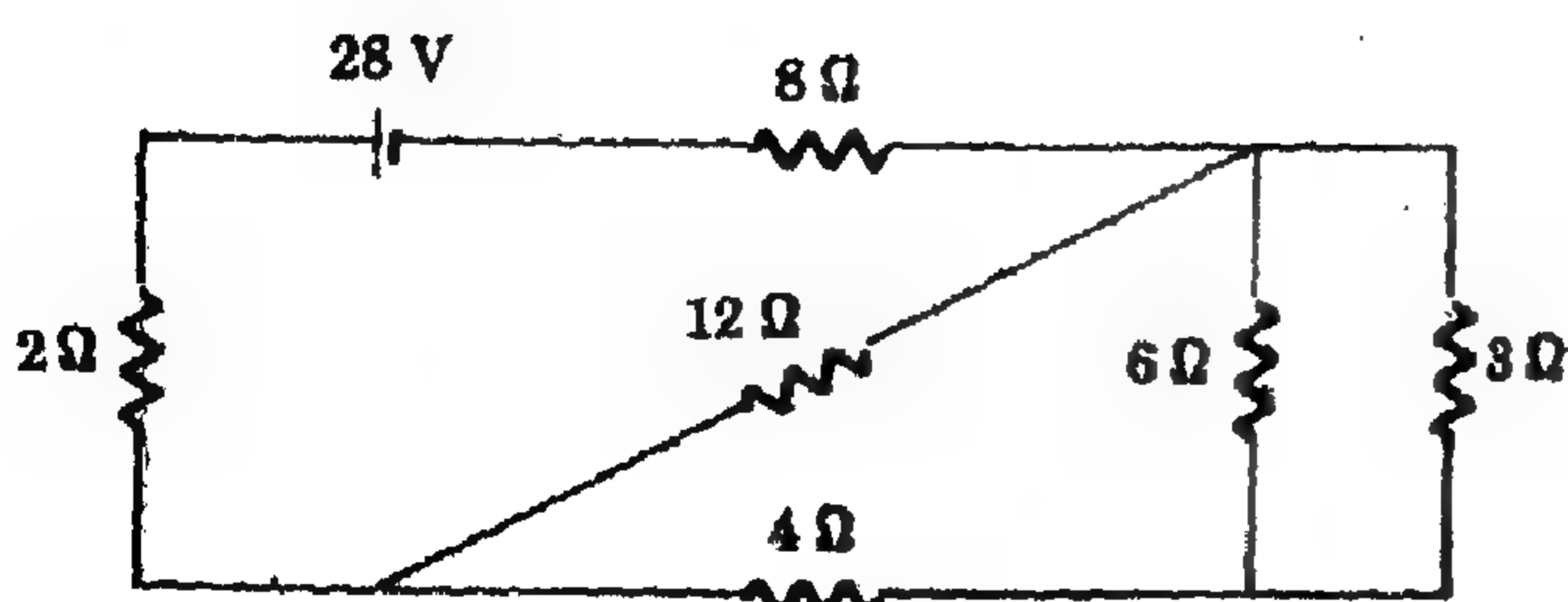
شكل م ١٨ - ٧



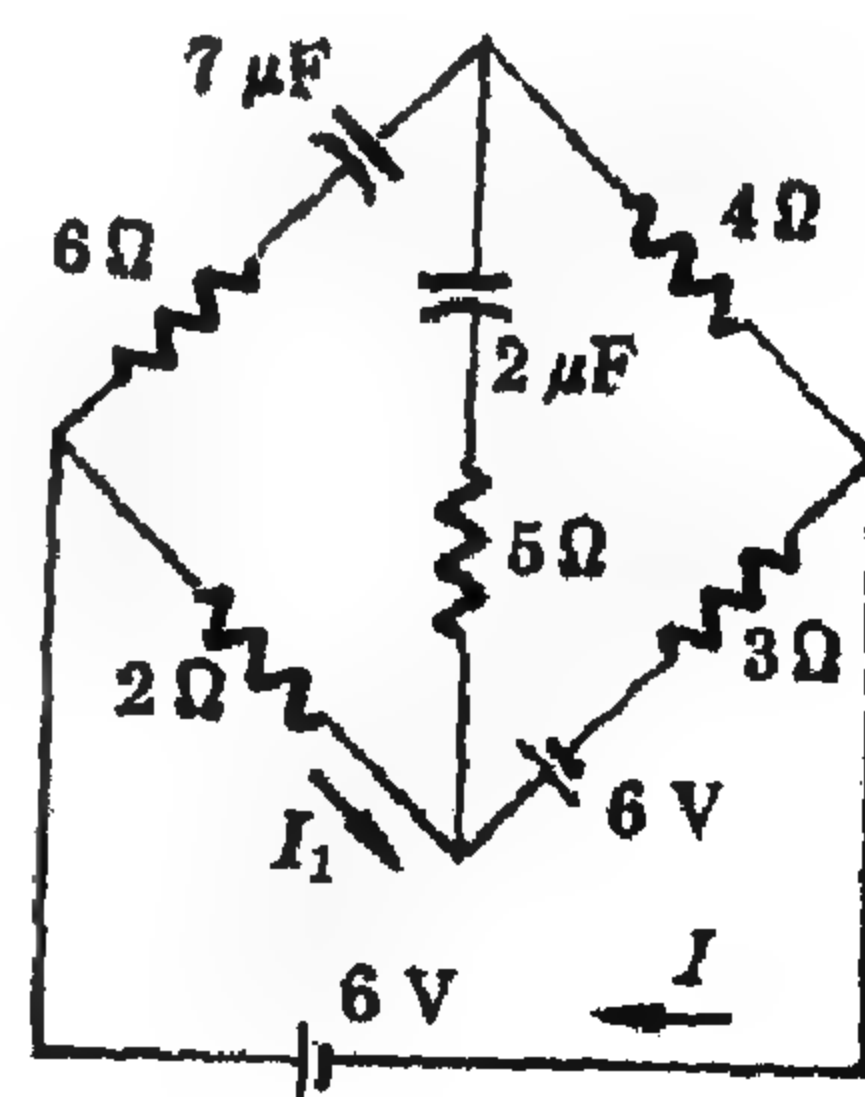
شكل م ١٨ - ٦



شكل م ١٨ - ٨



شكل م ١٨ - ١٠



شكل م ١٨ - ٩

١١ - * ارجع الى الدائرة في الشكل م ١٨ - ١١ . يقرأ الفولتميتر 5.0 V والاميتر 2.0 A حين يمر التيار في الاتجاه المين . اوجد (أ) R ، (ب) قيمة \mathcal{E} . (لاحظ عند كتابة معادلة الدائرة ان فرق الجهد عبر R هو 5 V).

١٢ - * في الشكل م (١٨ - ١١) ماهي قيمة \mathcal{E} الواجبة اذا كان التيار خلال البطارية 6 V صفرا وكانت R تساوي $12\ \Omega$ ؟

١٣ - * في الشكل م (١٨ - ١١) ، كم يجب أن تكون (أ) قراءة الأميتر (ب) قراءة الفولتميتر ، اذا كانت \mathcal{E} تساوي 20 V ، R تساوي $6.0\ \Omega$ ؟

١٤ - في دائرة ائارة منزلية خاصة ذات 120 V استعملت الاجهزة التالية : محمصة خبز 1200 W ، مصباح واحد 60 W ومكواه لحام 600 W ويحترق المصهر اذا أضىء مصباح 60 W آخر . ماهو الحجم التقريبي للمصهر ؟

١٥ - تقرر تشغيل مجفف 1200 W وغسالة يلزمها 360 W ، واربعه مصابيح كل منها 60 W ، وجهاز ردايو 40 W بحيث تعمل جميعها على نفس الخط 120 V . ماهي القيمة التقريبية للتيار الذي يجب أن يصمم المصهر من أجله ؟

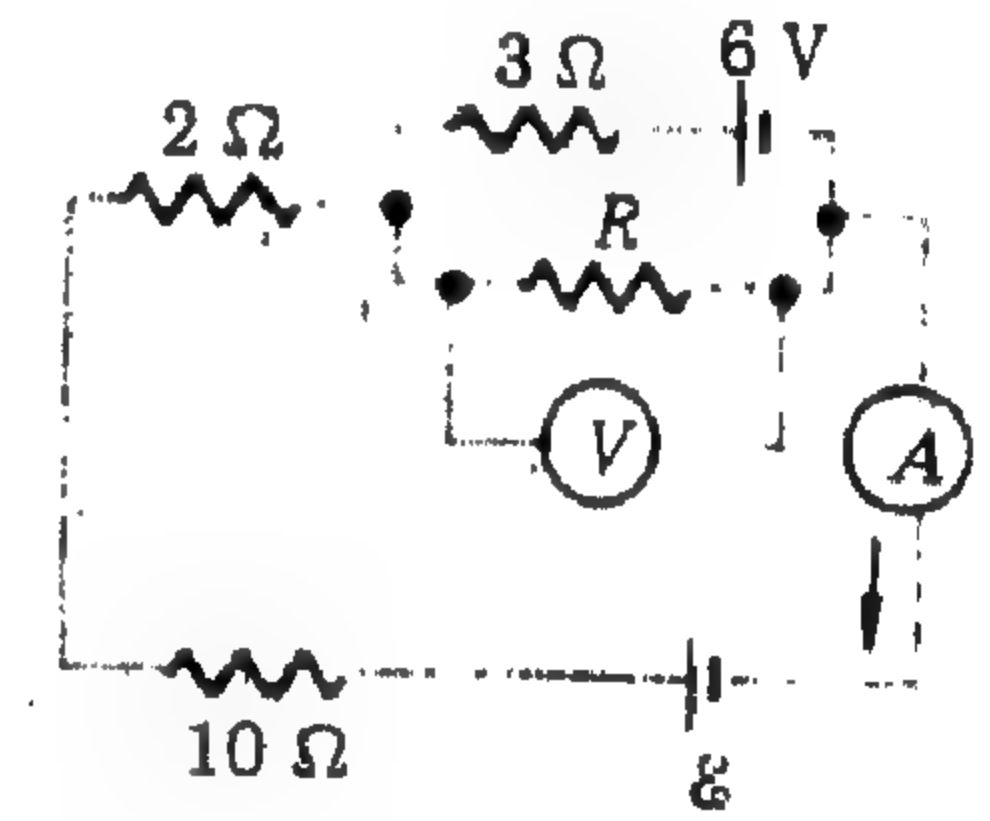
١٦ - يقرأ الأميتر في شكل م (١٨ - ١٢) تيارا قدره 3.0 A اوجد I_1 ، I_2 وكذا قراءة الفولتميتر .

١٧ - كان التيار خلال الأميتر في الشكل م (١٨ - ١٣) هو 3 A في الاتجاه المين .

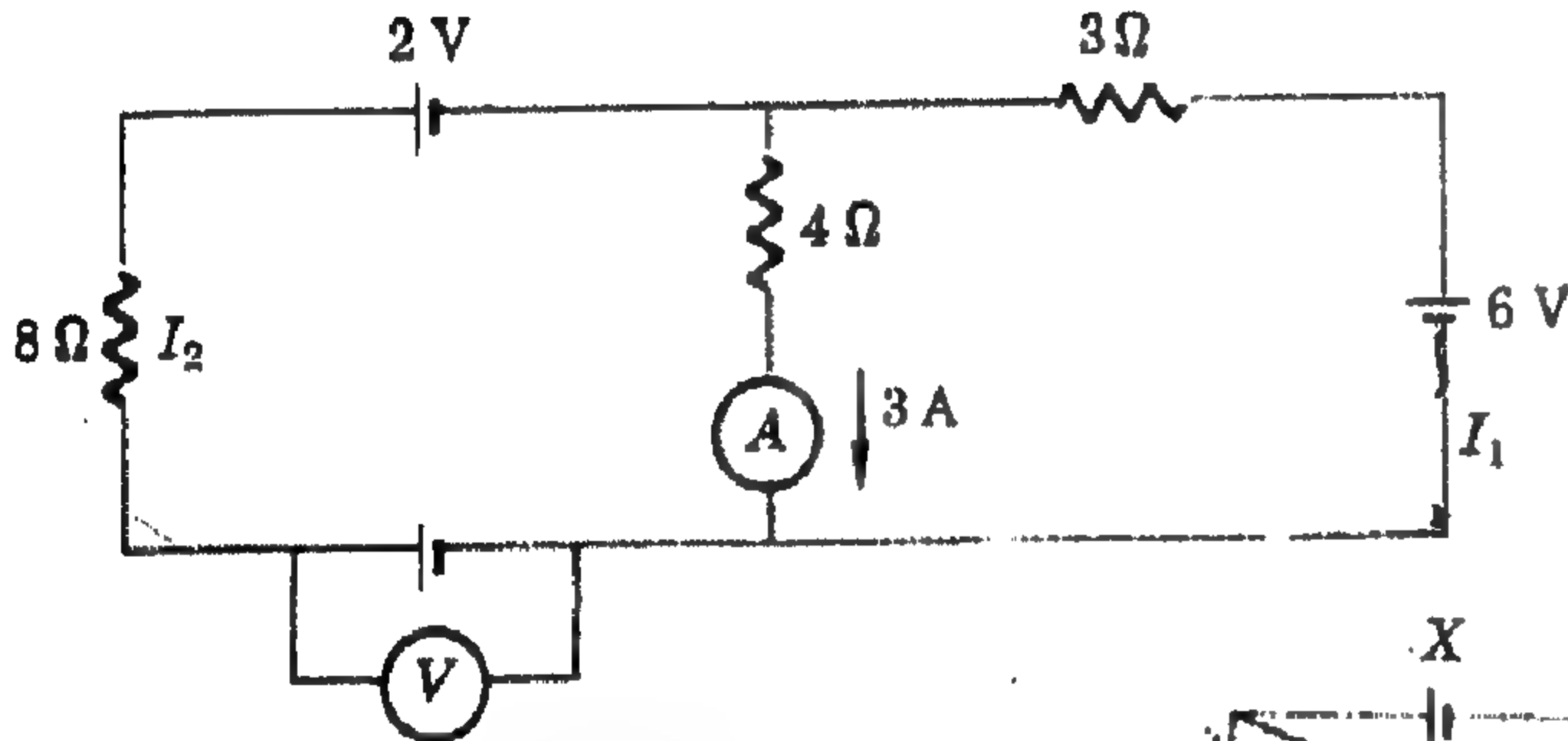
(أ) اوجد ق . د . ك . المجهولة ، X ، والتيارين المجهولين .

(ب) ماهي الشحنة على المكثف ؟

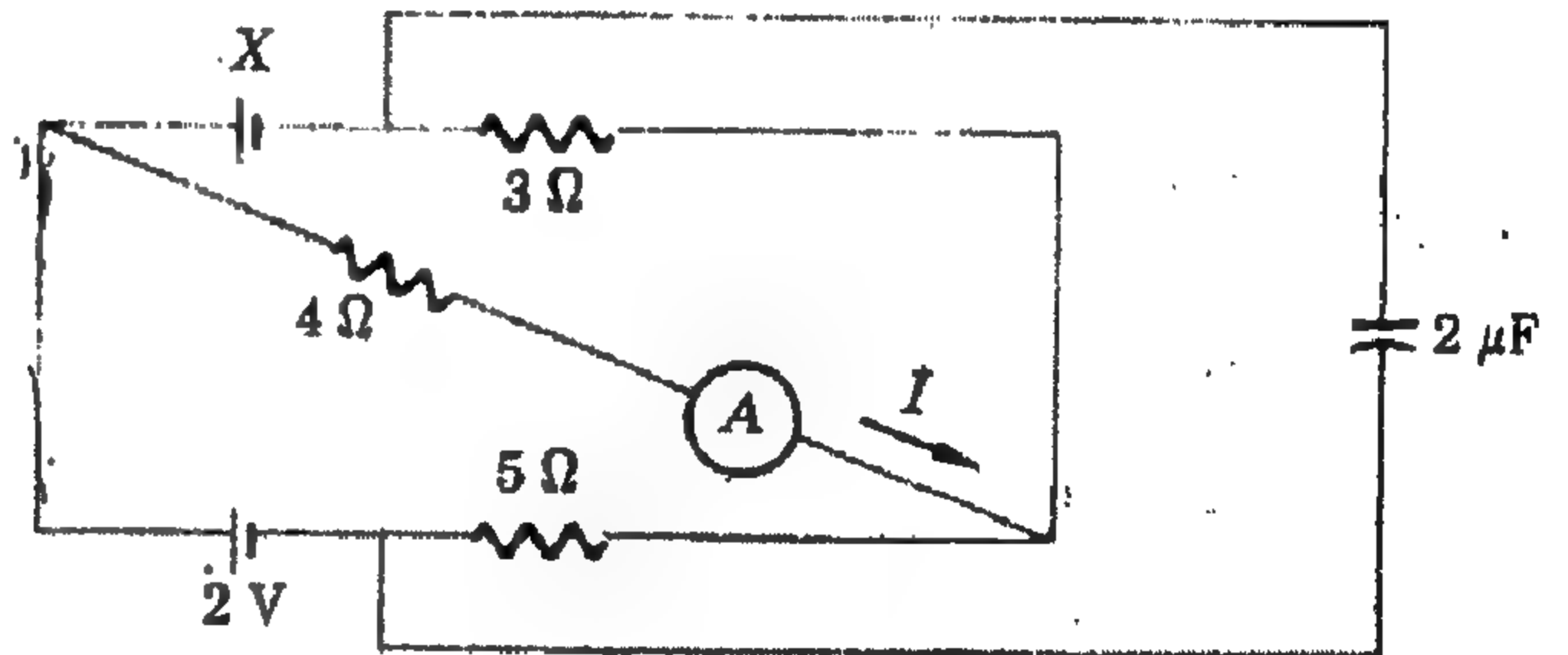
١٨ - اوجد قيم I_1 ، I_2 ، \mathcal{E} وكذا الشحنة على المكثف $2\ \mu\text{F}$ في الشكل م ١٨ - ١٤ .



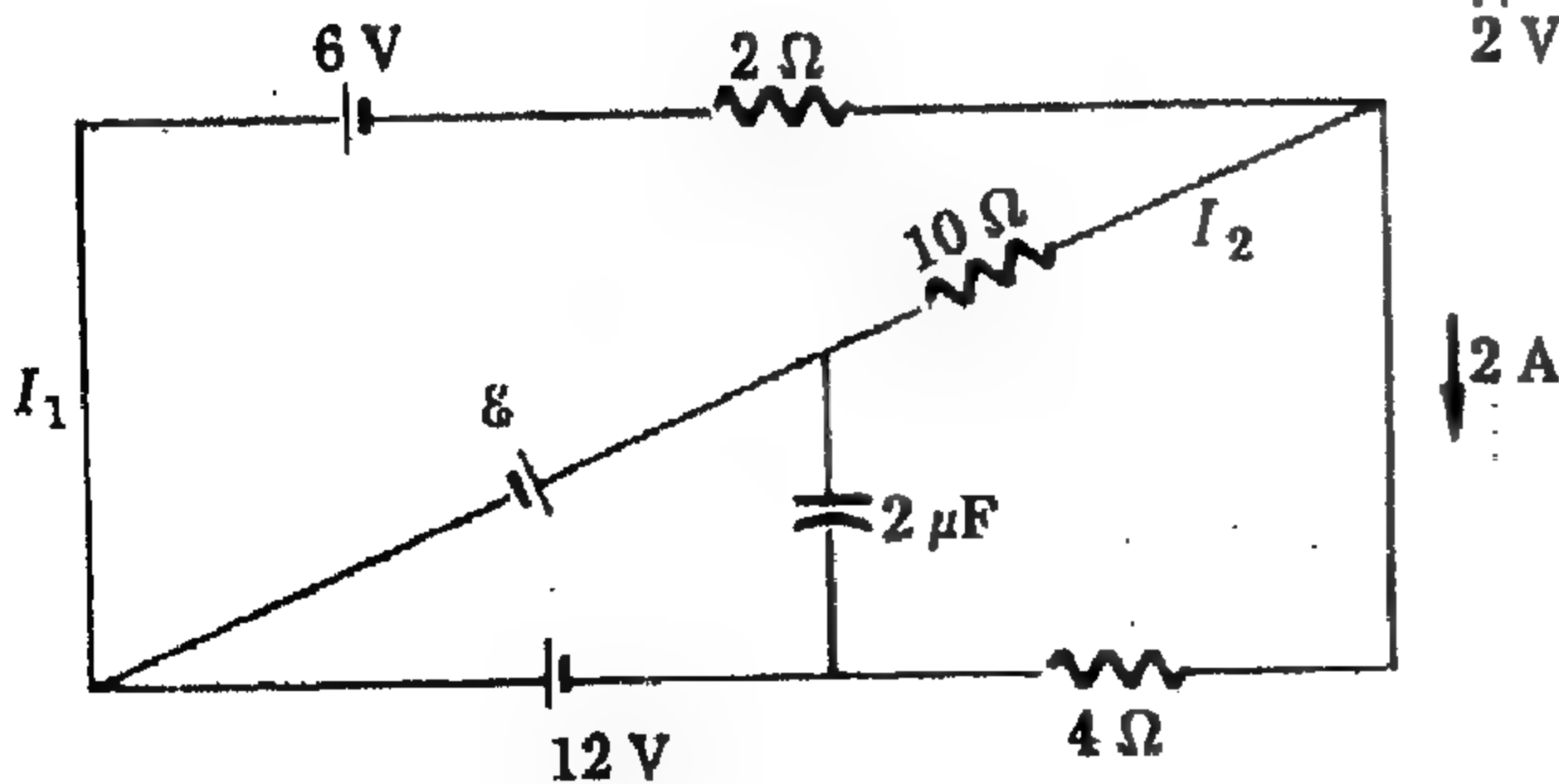
شكل م ١٨ - ١١



شكل م ١٨ - ١٢



شكل م ١٨ - ١٣



شكل م (١٨ - ١٤)

١٩ - اوجد التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 ، I_4 في الدائرة المبينة في شكل م (١٨ - ١٥) .

٢٠ - * في الشكل م ١٨ - ١٦ اوجد I_1 ، I_2 ، I_3 ، \mathcal{E} والشحنة على المكثف

٢١ - * شحنت المكثفات $2 \mu F$ ، $4 \mu F$ كل على حده حتى فرق جهد مقداره $12V$ عن طريق توصيلهما عبر بطارية كل في دوره وبعد أن شحنا وصلا ببعضهما البعض بحيث كان اللوحان الموجبان متصلان معا واللوحان السالبان متصلان معا . اوجد (أ) فرق الجهد عبر كل منهما و (ب) الشحنة الصافية على كل منهما . تلميح : لاحظ ان فرق الجهد عبر كليهما سيكون هو نفسه بعد توصيلهما معا .

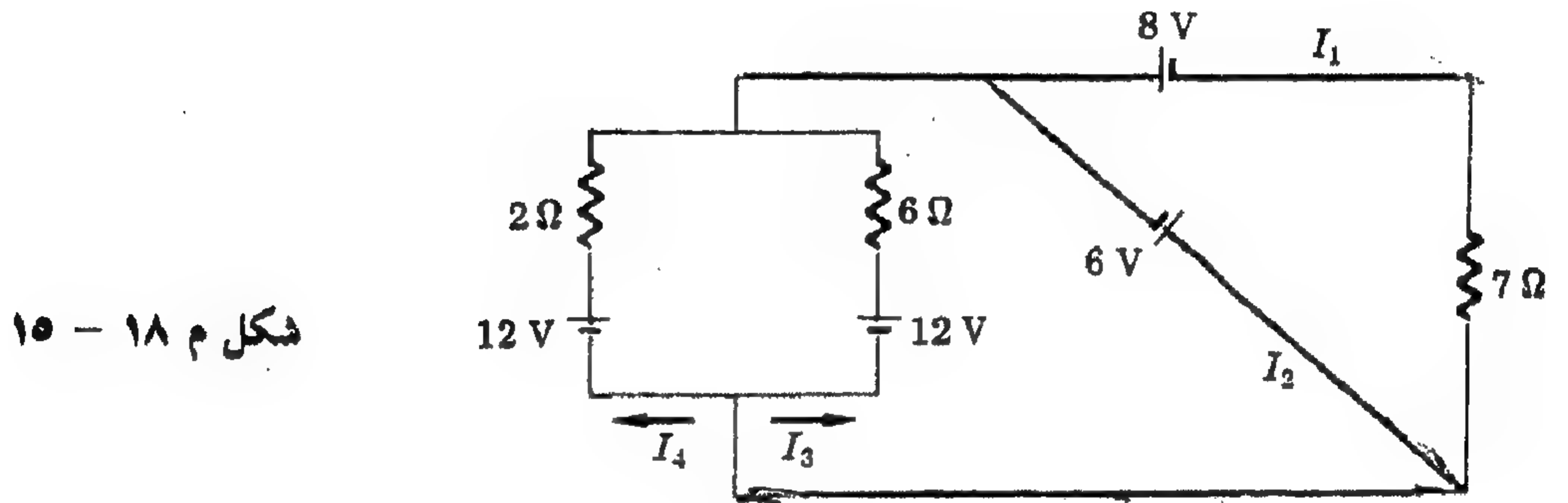
٢٢ - ** كرر المسألة 21 اذا كان المكثفان متصلان معا بحيث كان اللوح الموجب لاحدهما متصل باللوحة السالبة للآخر .

٢٣ - ** تبلغ قيمة كل مقاوم من التي بالشكل م (١٨ - ١٧) 2Ω اوجد المقاومة المكافئة بين A ، B

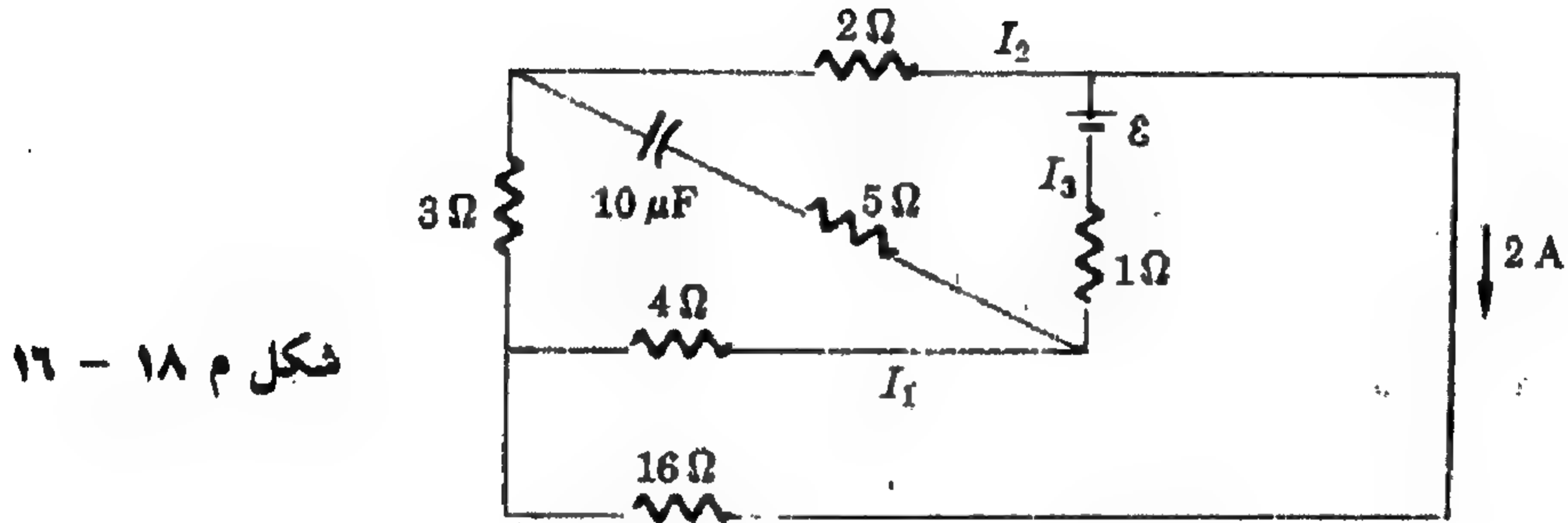
تلميح : من تماثل الشكل يحتوي كثير من الأسلاك على تيارات متماثلة .

٢٤ - * اثبت العلاقة المعطاه في شكل (١٨ - ١٠) للمكثفات المتصلة على التوازي .

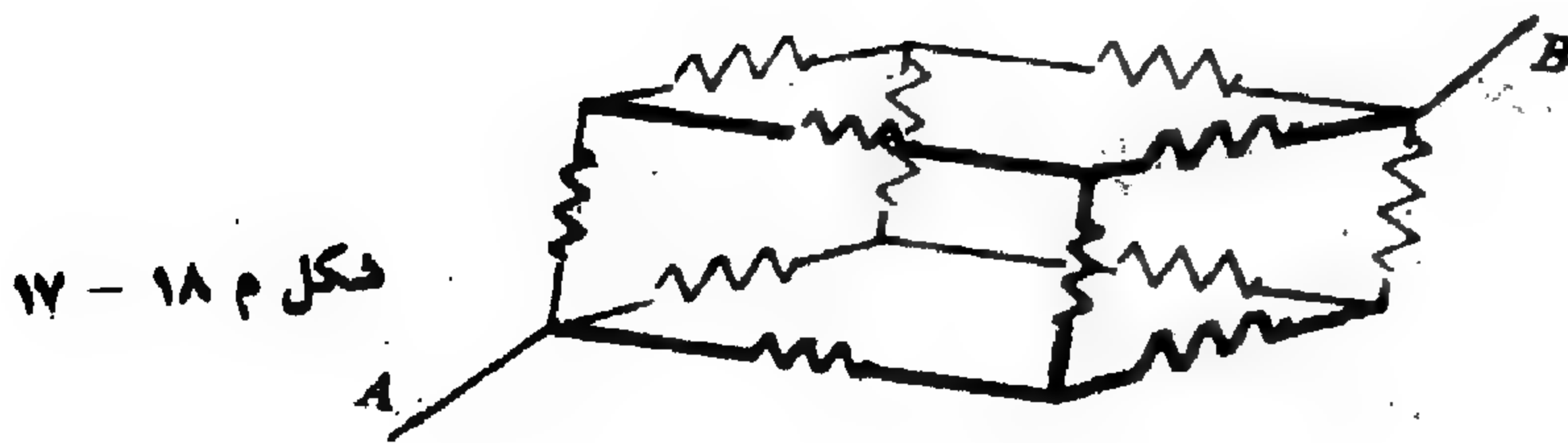
٢٥ - * اثبت العلاقة المعطاه في شكل ١٨ - ١٠ للمكثفات المتصلة على التوالي .



شكل م ١٨ - ١٥



شكل م ١٨ - ١٦



شكل م ١٨ - ١٧

الفصل التاسع عشر

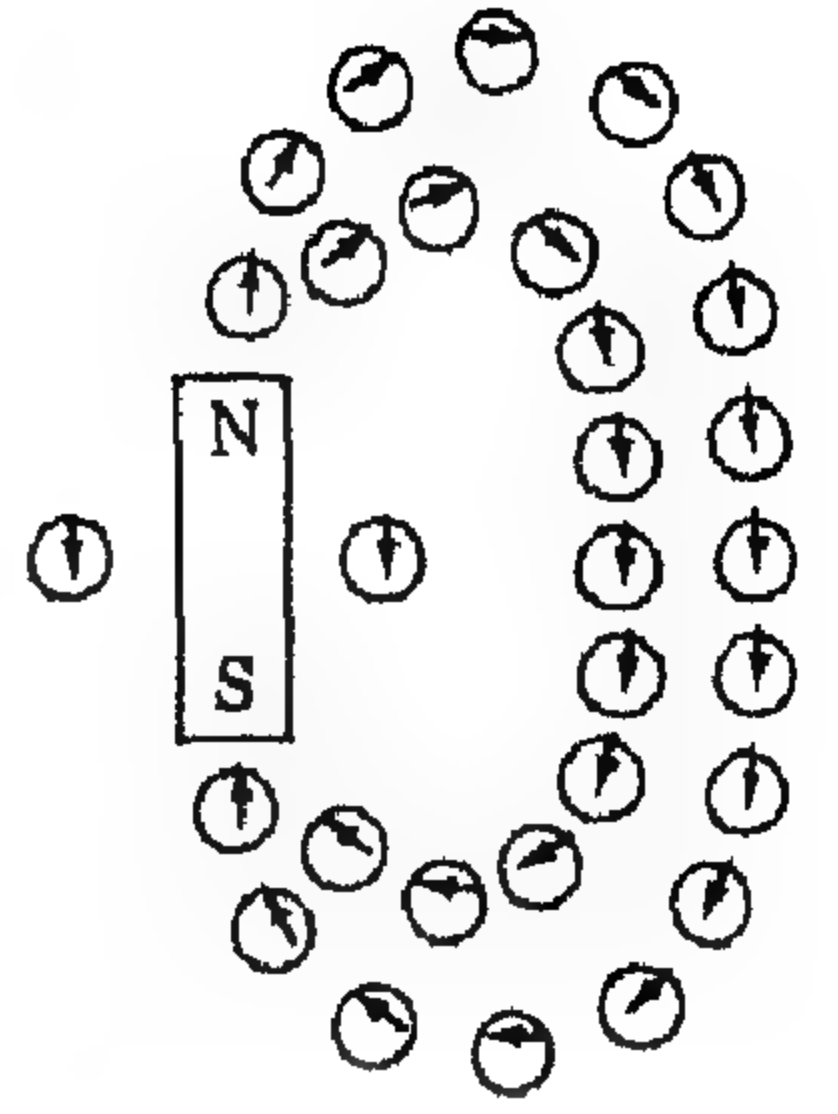
المغناطيسية

لاشك أننا جميعا قد حاولنا في وقت أو آخر أن نجري بعض التجارب البسيطة بالمغناطيسات كما نعلم أن لها مجالا مغناطيسيا حولها وأن مواد معينة تقع تحت تأثير قوى حين توضع في هذا المجال المغناطيسي . فالقطب الشمالى مثلا لأحد المغناطيسات يؤثر بقوة تنافر على القطب الشمالى لمغناطيس آخر موضوع بالقرب منه . وبالعكس تقوم الأقطاب الجنوبية للمغناطيسات بجذب الأقطاب الشمالية لمغناطيسات أخرى . بالإضافة الى هذا تنجذب قطع غير ممغنطة من بعض المواد بشدة (كالحديد مثلا) الى كل من القطبين الشمالى و الجنوبى للمغناطيسات .

على الرغم من أن كثيرا منا قد تعلم هذه الحقائق فى المدارس إلا أن تفسير هذه الحقائق البسيطة على المستوى الجزيئى ليس بسيطا . ولايزال موضوع المغناطيسية مجالا نشطا وشيقا من مجالات البحث حتى يومنا هذا . وستلاحظ فى هذا الفصل والذى يليه أن المغناطيسية تشكل أهمية لنا فى كثير من النواحي وكلما تقدمنا فى مناقشة الموضوع سيصبح أكثر وضوحا أن المغناطيسات وآثارها ليست إلا واجهة ضئيلة للمغناطيسية .

١٩ - ١ تخطيط المجالات المغناطيسية

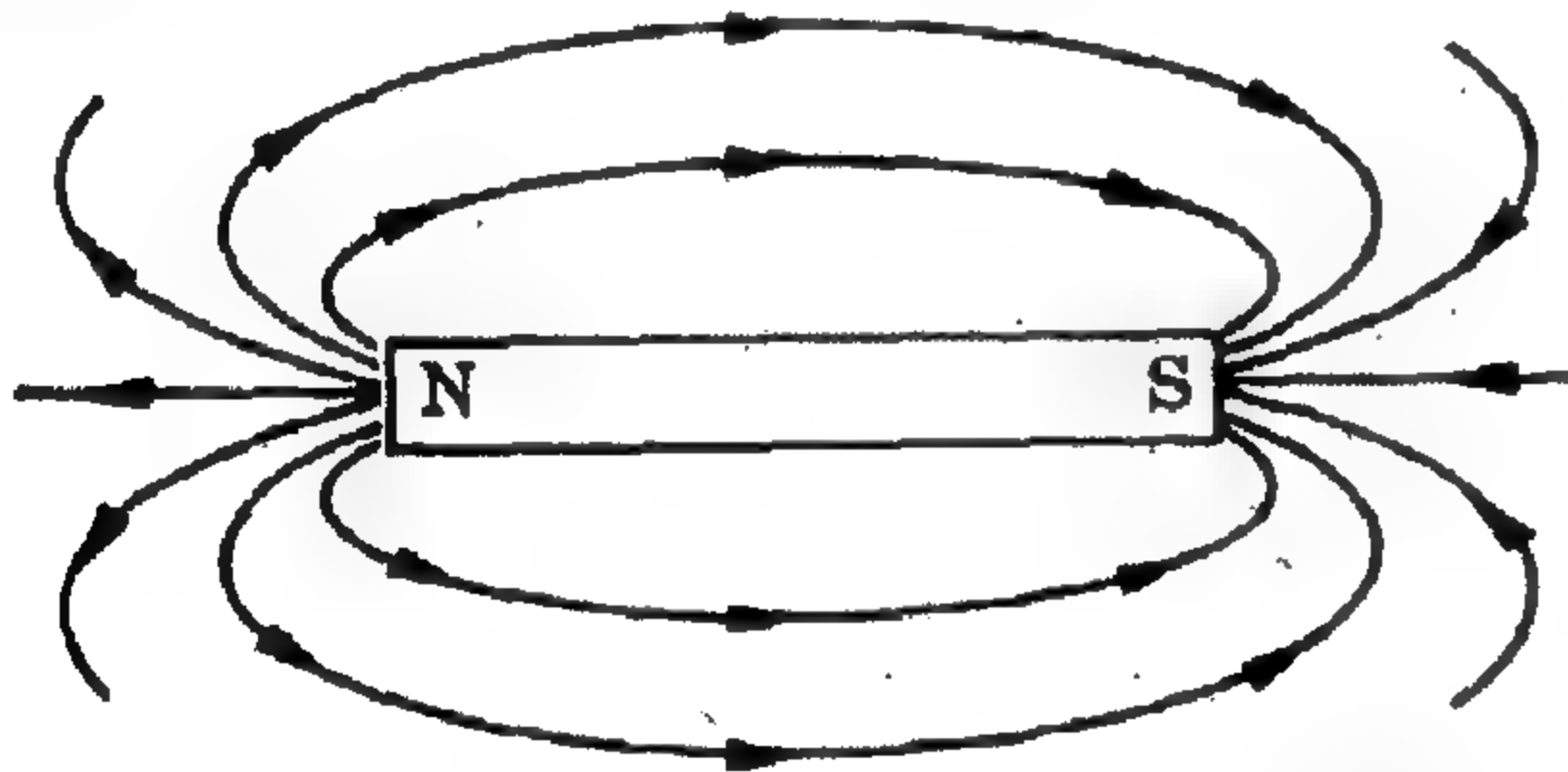
يتواجد المجال المغناطيسي في المنطقة المتاخمة للمغناطيس . وكبداية قد نصف المجال المغناطيسي بدلالة تأثيره على إبرة بوصلة . وكما قد تعلم فأبرة البوصلة ليست إلا مغناطيسا صغيرا ، وطرف الإبرة الذي يشير الى الشمال نتيجة للمجال المغناطيسي للكرة الأرضية يسمى **القطب الشمالى** للمغناطيس الإبرى ، فضلا عن ذلك يعرف المجال المغناطيسي بحيث أن القطب الشمالى لأبرة البوصلة يشير الى اتجاه مواز للمجال . إذا أخذنا هذا في الاعتبار بالإضافة الى حقيقة أن الأقطاب المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب فإنه يصبح من السهل تخطيط المجال المغناطيسي .



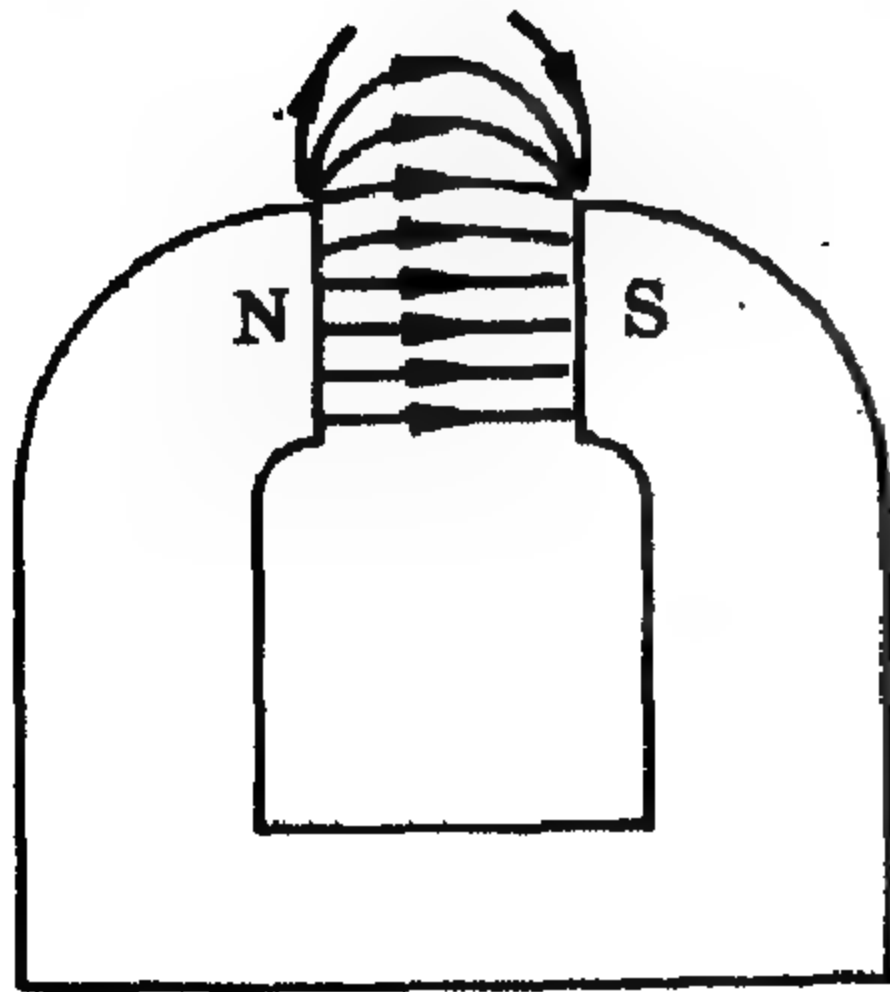
شكل ١٩ - ١

يمكن إيجاد اتجاه المجال المغناطيسي بجوار مغناطيس ما باستخدام إبرة البوصلة

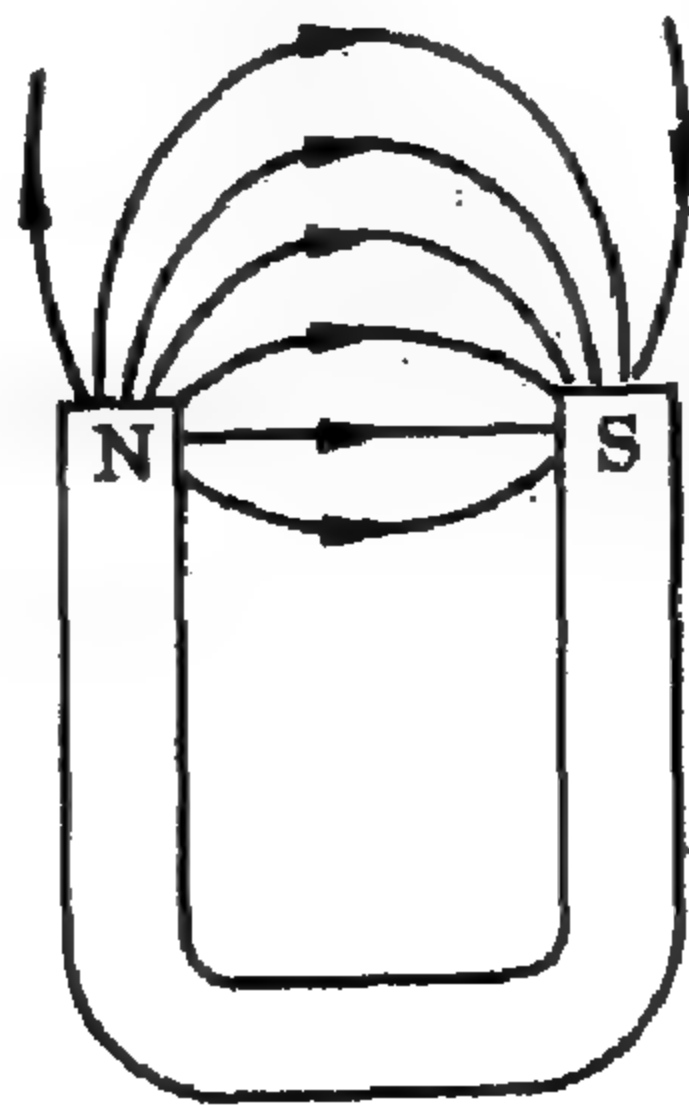
افترض كمثال بسيط اننا نريد تخطيط المجال المغناطيسي حول قضيب مغناطيسي . اذا وضعت بوصلة بجوار المغناطيس فإنها تصطف في اتجاه المجال المغناطيسي كما يوضح الشكل ١٩ - ١ ، حيث ترى عدة بوصلات . وعليك أن تقنع نفسك أن الاقطاب الشمالية للإبر (رؤوس الأسهم) ستصطف ، كما هو مبين تحت تأثير التنافر مع القطب الشمالى والتجاذب مع القطب الجنوبى للمغناطيس . وتتكون « صورة » المجال المغناطيسي عن طريق رسم سلسلة من الخطوط حول المغناطيس بحيث تبين هذه الخطوط الاتجاه الذى تشير اليه إبرة البوصلة ، وقد تم هذا بالنسبة لقضيب مغناطيسي في الشكل (١٩ - ١) ، أما المجالات التى تخطط بأنواع أخرى من المغناطيسات فترى في الاجزاء (ب) و (ج) في نفس الشكل . ولاحظ أن المجال



(أ)



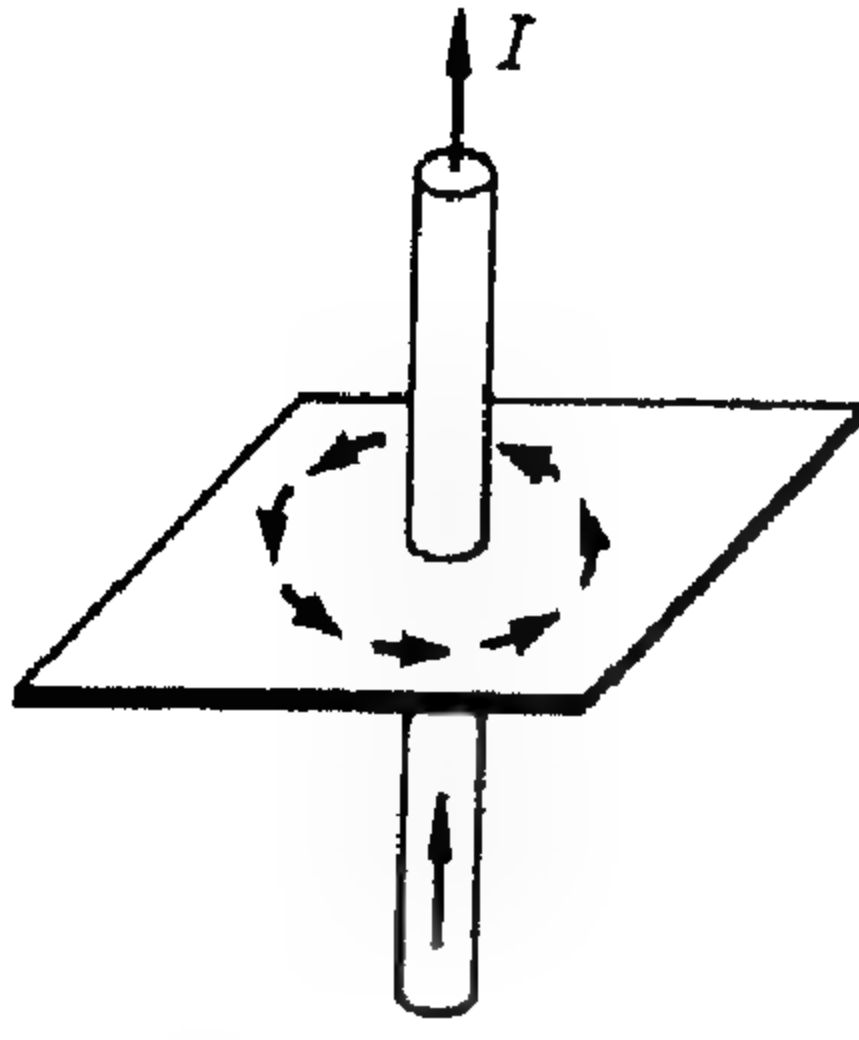
(ب)



(ج)

شكل ١٩ - ٢

يتجه المجال المغناطيسي بعيدا عن القطب الشمالى وداخلا الى القطب الجنوبى



شكل ١٩ - ٣

يكون المجال المغناطيسي دوائر
متحدة المركز مع السلك
الذي يحمل التيار .

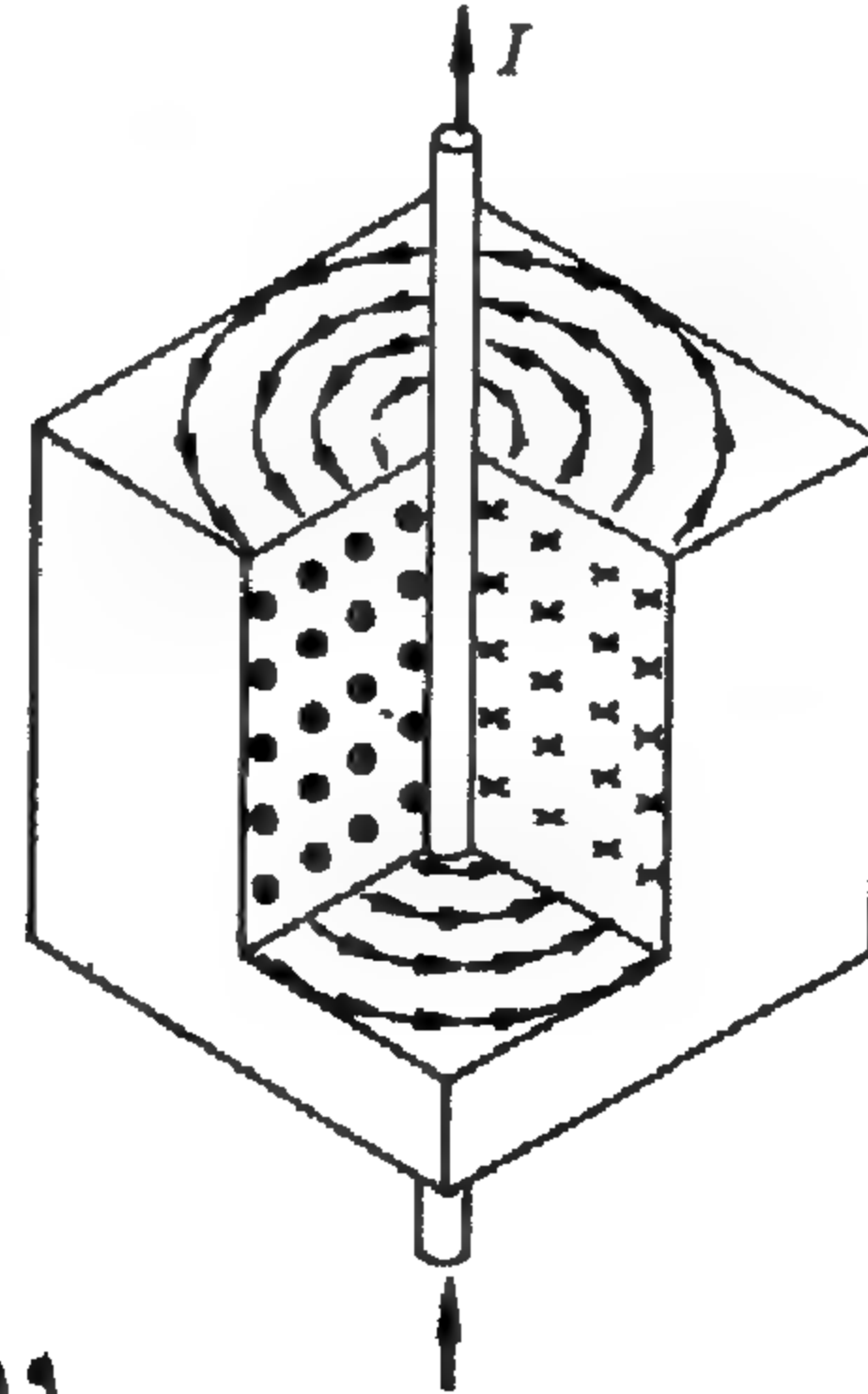
يأخذ الاتجاه الخارج من القطب الشمالي والمقبل على القطب الجنوبي لماذا ؟ (تذكر
أن اتجاه المجال عند نقطة ما يكون موازيا للاتجاه الذي تشير اليه ابرة البوصلة) .

كثير من الملاحم الهامة للمجال المغناطيسي يمكن التيقن منها من صور كالموجودة
في الشكل ١٩ - ٢ ، وعلى وجه الخصوص يمكن اعتبار الكثافة النسبية
للخطوط في شكل معين كمقياس لشدة المجال بنفس الطريقة التي استخدمت
مع المجالات الكهربائية . ونتيجة لهذا فان خطوط المجال المغناطيسي في شكل ما
ليست فقط صورة لاتجاه المجال وانما تشير أيضا الى قيمته النسبية .

١٩ - ٢ المجالات المغناطيسية للتيارات

ليست المغناطيسات هي المصدر الوحيد للمجالات المغناطيسية ، فقد اكتشف
هانز كريستيان أورستد ، عام ١٨٢٠ أنه اذا سري تيار في سلك فسينتج عن ذلك
انحراف لإبرة بوصلة مجاورة . وقد بين هذا أن التيار المار في سلك له القدرة على
توليد مجال مغناطيسي ونحن نعلم الآن ، من تجارب مختلفة أخرى ، صحة هذا
الأمر ، فضلا عن هذا هناك دلائل على أن المجال المغناطيسي لمغناطيس ما قد يكون
أيضا نتيجة لحركات الشحنات .

لقد بحث أورستد طبيعة المجال المغناطيسي لسلك مستقيم طويل يحمل تيارا و بين
الشكل ١٩ - ٣ تجربة أورستد . يحمل السلك تيارا في الاتجاه المشار اليه . عند
وضع بوصلة بالقرب من السلك فإن الإبرة تستقر بحيث يكون طولها مماسا لدائرة
متحدة المركز مع السلك مما يدل على أن المجال المغناطيسي موجود على هيئة دائرية
حول السلك . وكما هو متوقع تبلغ شدة المجال أقصاها بجوار السلك مباشرة . يوضح
الشكل ١٩ - ٤ تمثيلا ذا ثلاثة أبعاد للمجال المغناطيسي ، وفي هذا الشكل كما في
الاشكال التالية سيكون رمز النقطة دليلا على أن السهم في اتجاه القارئ أما الرمز X
فتمثل سهمها متجها بعيدا عن القارئ وهذان الرمان عنى بهما الإشارة الى رأس
السهم وذيله .

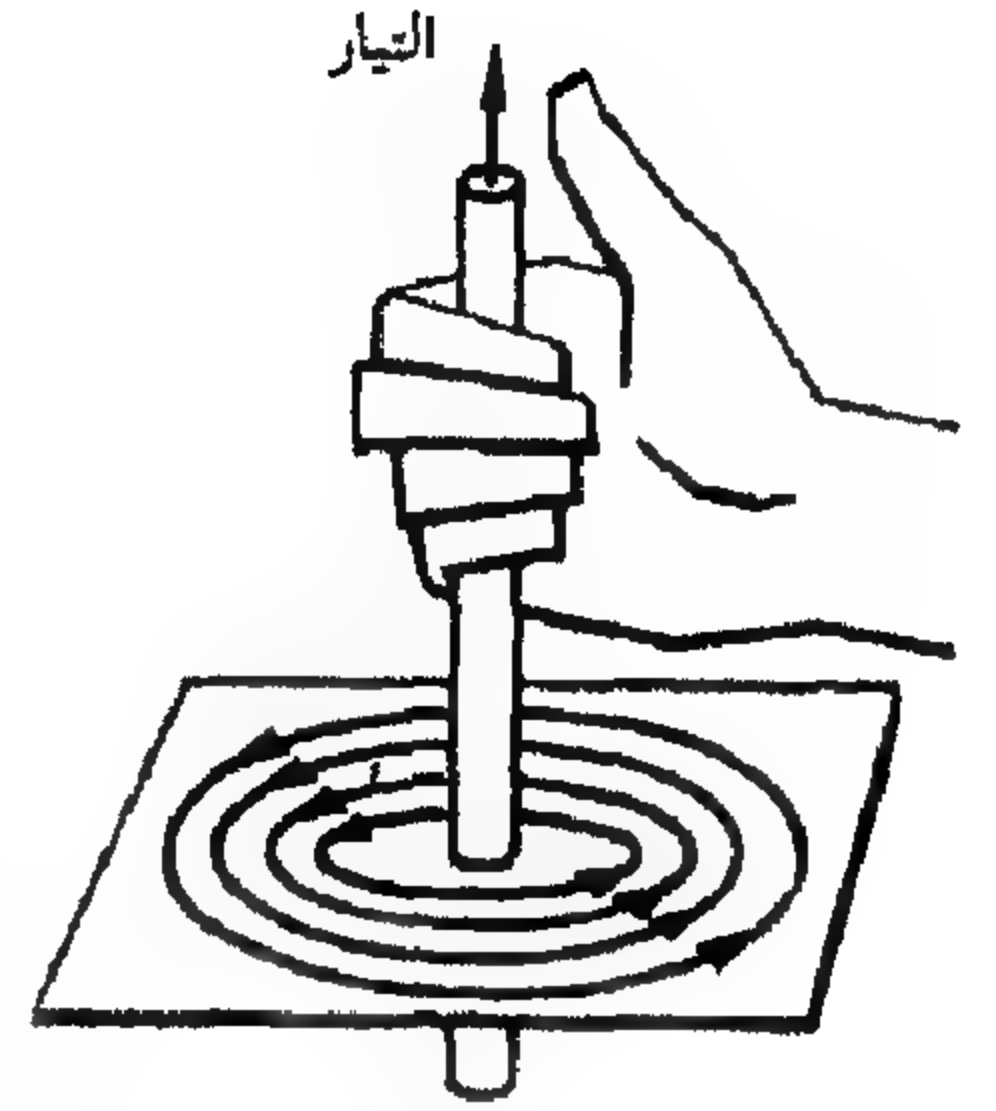


شكل ١٩ - ٤

يدور المجال المغناطيسي حول
السلك المستقيم الطويل
ويتضاءل هذا المجال عكسيا
عند البعد عن السلك .

هناك قاعدة بسيطة تدلنا على اتجاه المجال المغناطيسي حول سلك ماتسمى قاعدة اليد اليمنى . قاعدة اليد اليمنى فلو أننا قبضنا على السلك باليد اليمنى بحيث كان الإبهام مشيراً إلى اتجاه التيار ، فإن الأصابع ستحيط بالسلك مشيرة إلى اتجاه المجال . ويوضح الشكل التخطيطي ١٩ - ٥ هذه القاعدة .

قاعدة اليد اليمنى .
للمجال المغناطيسي



شكل ١٩ - ٥

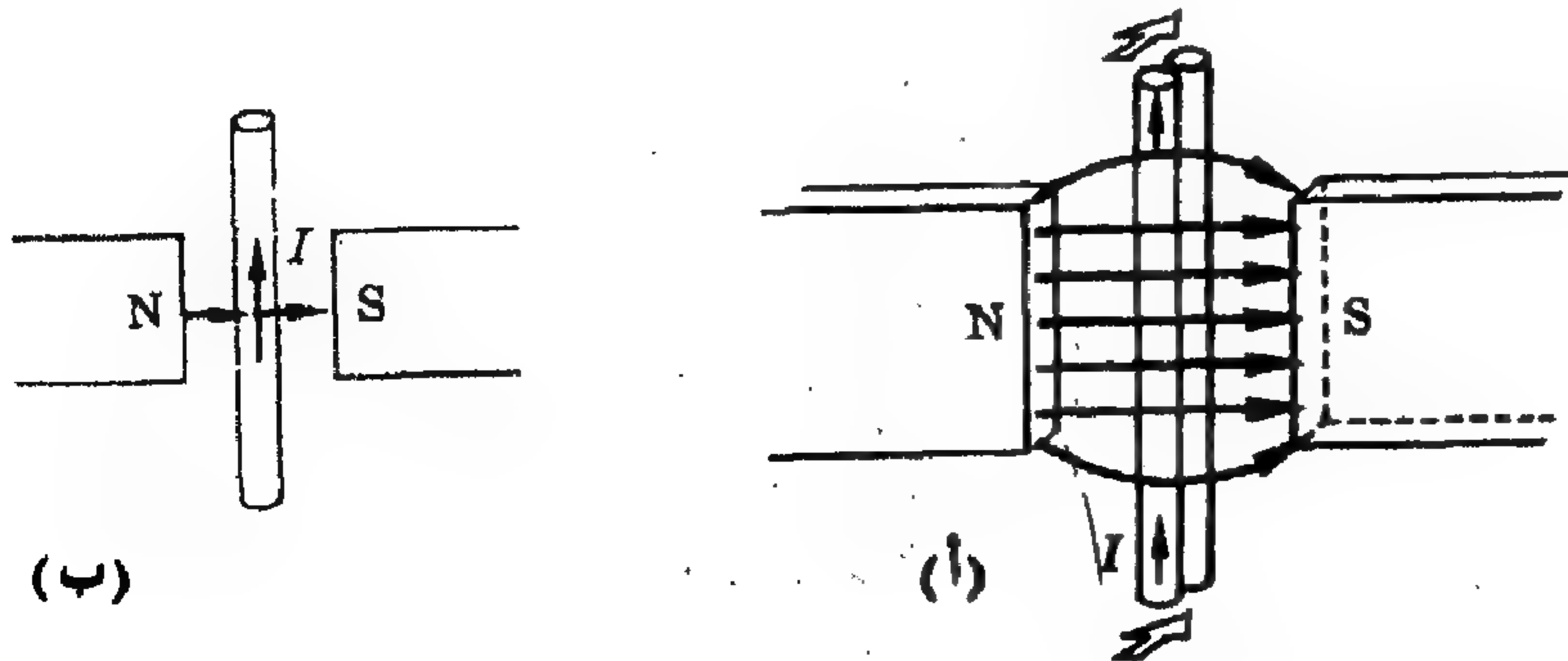
حين يقبض انسان على السلك بيده اليمنى بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التيار فإن الأصابع تلف حول السلك بنفس الطريقة التي تلف بها المجال .

١٩ - ٣ القوة المؤثرة على تيار في مجال مغناطيسي

ناقشنا حتى الآن الجوانب الكيفية فقط للمجال المغناطيسي ونود الآن البحث عن وسيلة لقياسه بدقة . ويمكن عمل هذا باستخدام حقيقة أنه اذا وضع سلك يحمل تيارا في مجال مغناطيسي فإنه يتعرض لقوة . ولبيان هذه الظاهرة في تجربة نموذجية يوضع سلك بين قطبي مغناطيس كما هو مبين في الشكل ١٩ - ٦ أ وعندما يسري تيار I خلال السلك في الاتجاه المشار اليه ، فإن السلك يتعرض لقوة تدفعه في الاتجاه المبين . فإذا عكس اتجاه التيار ينعكس اتجاه القوة المؤثرة على السلك . اذا أعيد رسم الموقف الممثل في الشكل ١٩ - ٦ أ لكي يوضح في بعدين كما في الجزء (ب) فإننا نلاحظ أن خط السلك وخط المجال المغناطيسي الذي يقطعه يحددان معا مستوى واحدا وهو مستوى الصفحة . (تذكر أن تقاطع خطين مستقيمين يحدد مستوى .) وتكون القوة المؤثرة على السلك دائما عمودية على هذا المستوى وسنعود قريبا الى هذه القاعدة .

يعتمد مقدار القوة F المؤثرة على السلك على عدة عوامل . وبالرجوع الى التجربة يمكننا فصل كل عامل على حدة ثم تحديد العلاقات بين العوامل بدقة . لقد وجد أن القوة تتناسب طرديا مع كل من التيار I في السلك وطول السلك L الموجود في المجال المغناطيسي فحين يتضاعف التيار تتضاعف تبعا لذلك القوة . سنختار تعريفا للمجال المغناطيسي بدلالة متجه B له اتجاه عند نقطة ما مطابق لاتجاه المجال المغناطيسي عند تلك النقطة . ومقدار B سيعتبر متناسبا مع القوة التي يتعرض لها السلك الذي يحمل تيارا وهو بالمجال . ومن ثم فإن القوة التي

متجه المجال المغناطيسي B



شكل ١٩ - ٦

يقوم المجال المغناطيسي بعرض السلك لقوة وفي الجزء (ب) متجه هذه القوة الى داخل الصفحة

تؤثر على سلك طوله L يحمل تيارا قدره I في مجال مغناطيسي شدته B يعطى بالعلاقة :

$$F \propto BIL$$

على أن هناك بعض المضاعفات ، فعندما يكون السلك على خط واحد مع المجال كما هو مبين في شكل (١٩ - ١٧) ، فإن القوة المؤثرة عليه تكون صفرا . وقد بينت تجارب أخرى أن القوة المؤثرة على السلك تتناسب مع مركبة B المتعامدة مع السلك ، وهذه المركبة وهى B_{\perp} موضحة في الشكل ١٩ - ٧ ب .

سنعرف وحدات شدة المجال B بحيث تكون القوة المؤثرة على السلك القوة المغناطيسية المؤثرة على التيار هى :

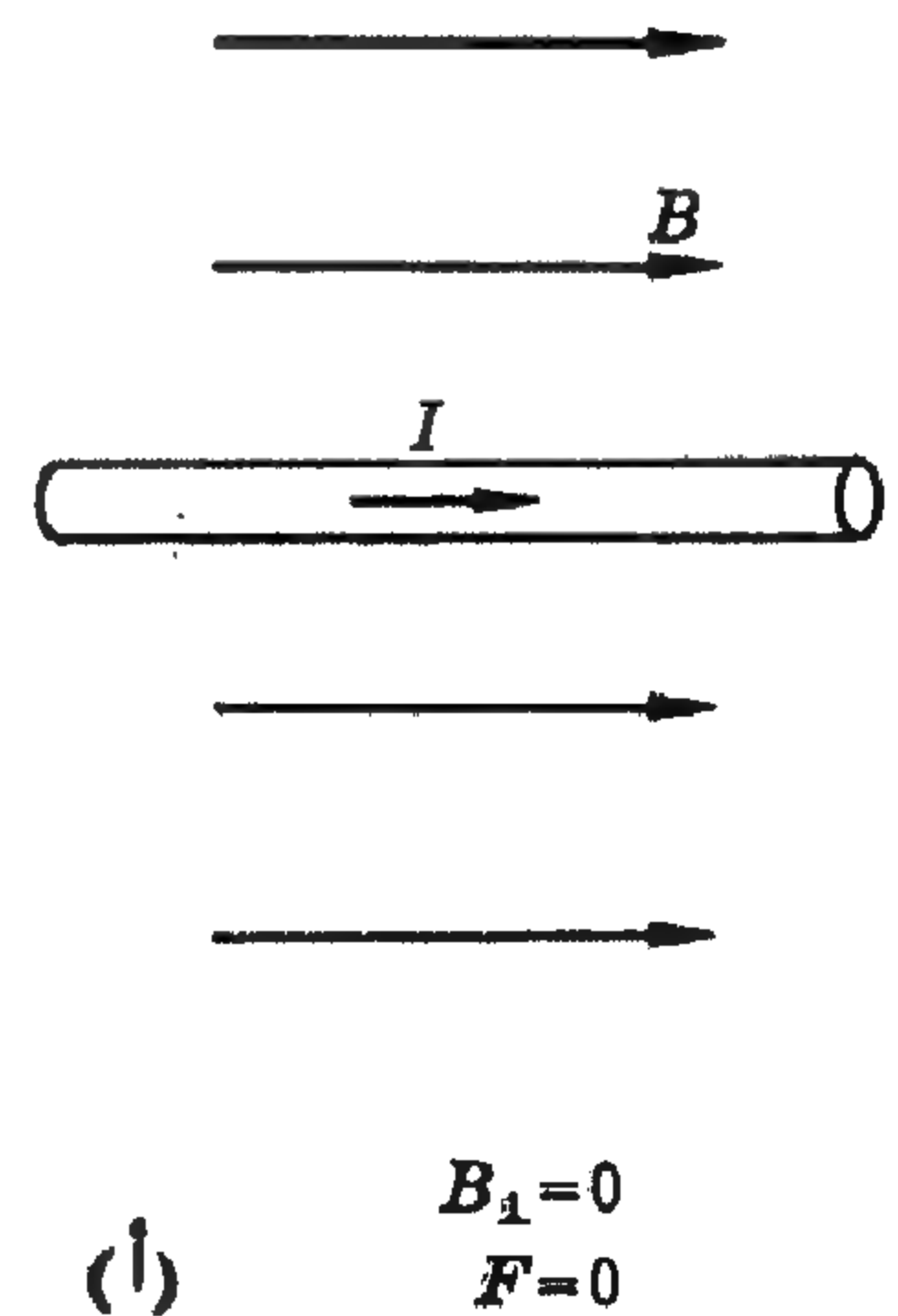
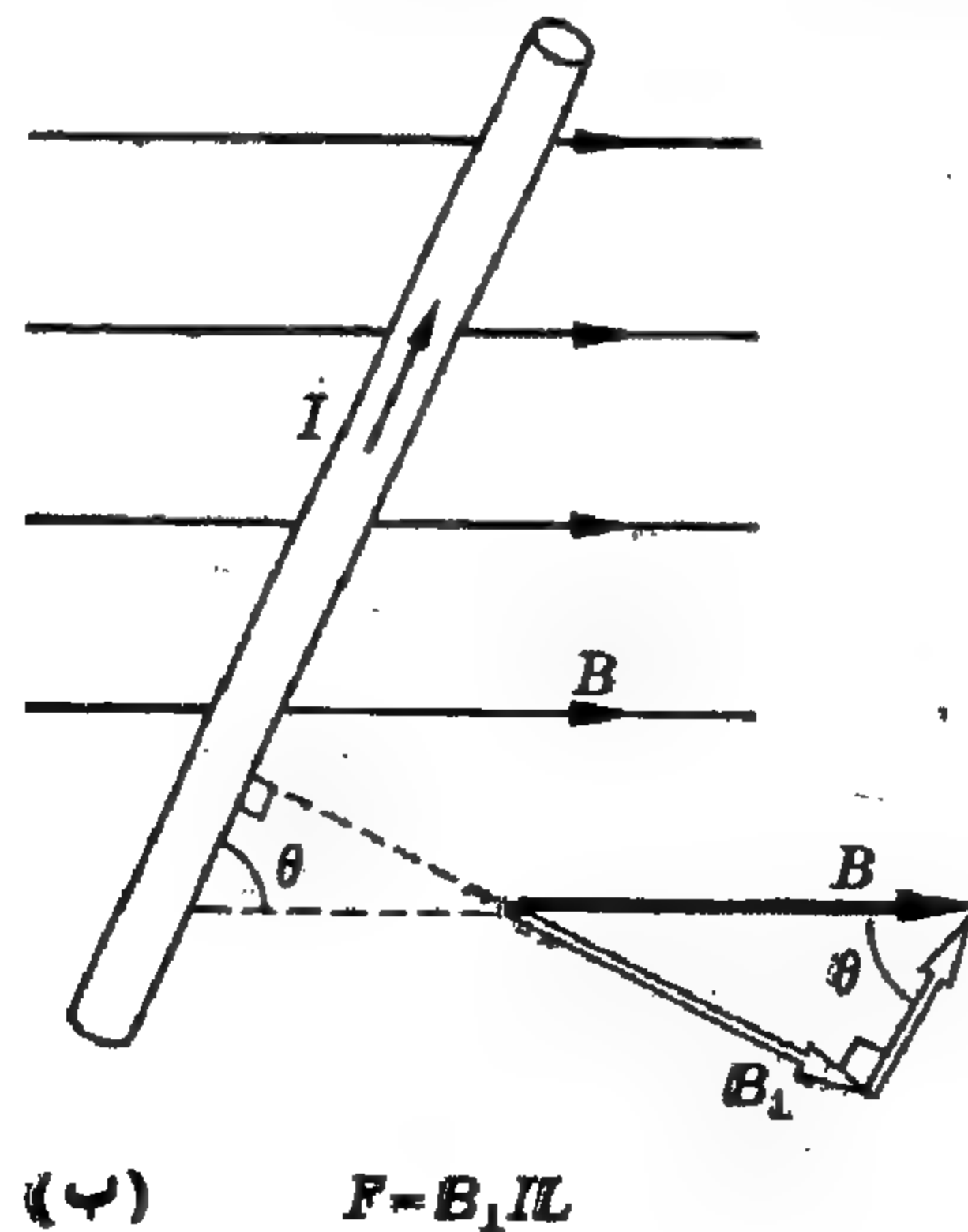
$$F = B_{\perp} IL \quad (١٩ - ١)$$

وكل من له صديق يحمل هذا الاسم (BIL) لن يجد صعوبة في تذكر هذه المعادلة مع ملاحظة أن B_{\perp} ليست الا $B \sin \theta$ ، حيث θ هى الزاوية المبينة في الشكل ١٩ - ٧ ب

إن الوحدات المعروفة في المعادلة (١٩ - ١) للكمية B هى (Wb/m^2) وتسمى أيضا $tesla (T)$ ، $weber/m^2$

وسنستخدم كلتا التسميتين بالتناوب ، وهذه الوحدة هى $N/(A)(m)$ حسب المعادلة (١٩ - ١) فكماعتاد F مقاسه بوحدات newtons ، I بوحدات amperes أما L فمقاسه بوحدات meter وقد كنا نود أن نطلق على B اسم شدة اسم ووحدات B

شكل ١٩ - ٧
تناسب القوة المؤثرة على
سلك يحمل تيارا مع مركبة B
التي تعامد مع السلك



المجال المغناطيسي ، الا أن هذا الاسم يحجز لكمية أخرى ، على أن هناك العديد من الأسماء التي تطلق على B وأكثرها قبولا هي كثافة التدفق والحث المغناطيسي ويشار دائما الى هذه الكمية باللغة الدارجة على أنها شدة المجال المغناطيسي

وهناك وحدة أخرى تستعمل للتعبير عن B وهي gauss (G) ، وهي وحدة أصغر بكثير عن وحدة weber/square meter إذ أن العلاقة بينهما هي $10^4 G = 1 \text{ wb/m}^2$. وليست وحدة gauss عضوا في عائلة وحدات SI ولذا فلن نستخدمها في معادلاتنا

مثال توضيحي ١٩ - ١ : اوجد القوة المؤثرة على طول قدره 300cm من السلك الممين في الشكل ١٩ - ٧ ب إذا كانت $\theta = 53^\circ$ والتيار 20A أما B فكانت 2.0G طريقة الحل : ان قيمة B_{\perp} تبلغ $0.8B$ ، ومن ثم باستخدام المعادلة (١٩ - ١) نجد

$$F = [(2 \times 10^{-4} \text{ T})(0.8)](20 \text{ A})(3.0 \text{ m}) = 0.0096 \text{ N}$$

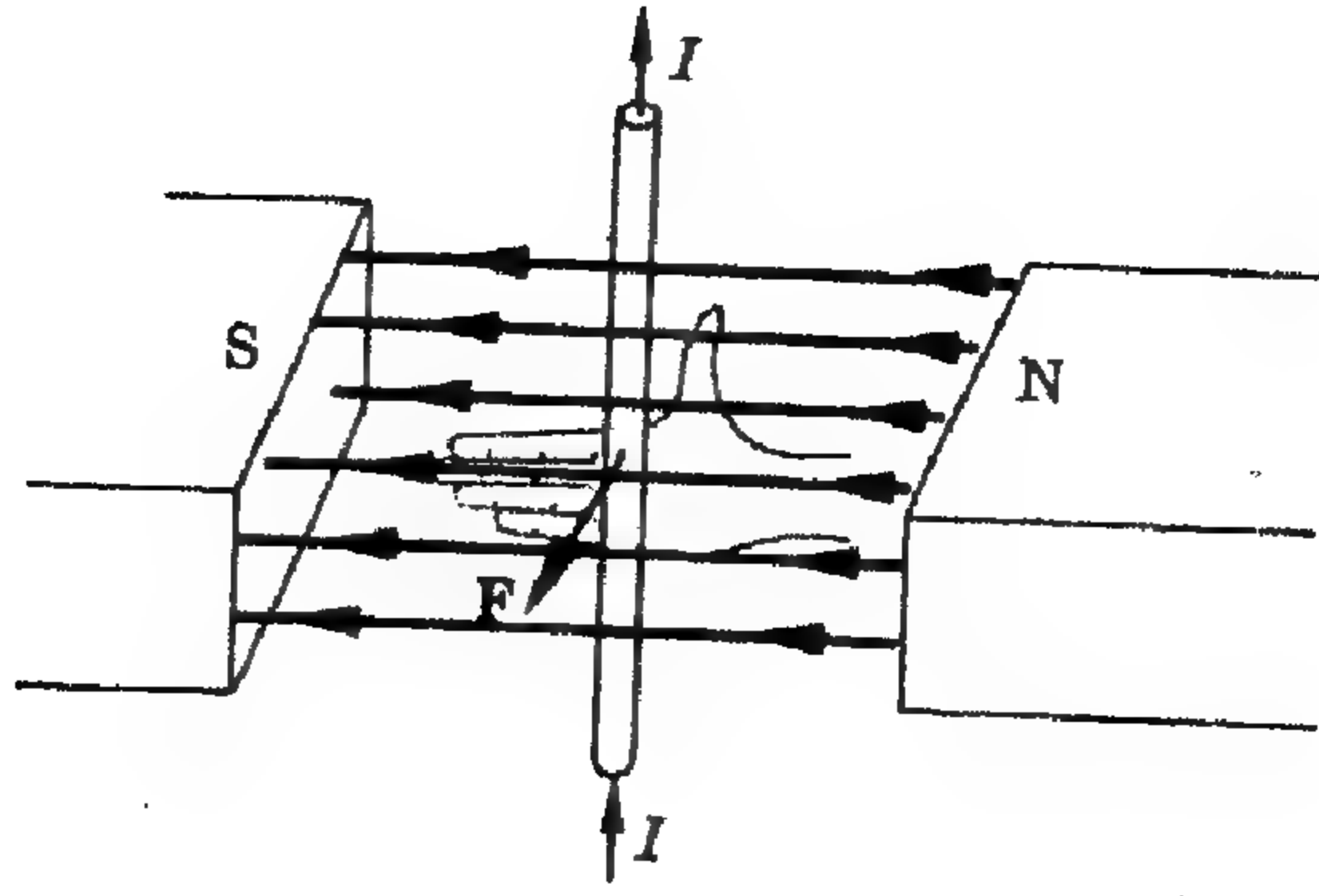
ولما كان gauss ، cm ليسا من وحدات SI الصحيحة فقد استبدل بهما tesla و meter على الترتيب . وسنعود في القسم التالي بتعلم كيفية إيجاد اتجاه القوة .

١٩ - ٤ امتداد قاعدة اليد اليمنى

بينما في القسم السابق أن اتجاه القوة التي يتعرض لها سلك يحمل تيارا في مجال مغناطيسي يكون عموديا على المستوى الذي يتحدد بكل من السلك والمجال . سنقوم الآن بدراسة امتداد بديهي بسيط لقاعدة اليد اليمنى (المذكورة في القسم ١٩ - ٢) مما يتيح لنا أن نعرف اتجاه القوة التي يتعرض لها السلك . وهي في الحقيقة ليست إلا وسيلة بديهية محضة لتذكر اتجاه القوة ولا يجب الصاق أى معنى فيزيائى بهذه القاعدة لأنها ببساطة قاعدة ذهنية .

قاعدة اليد اليمنى للقوة المغناطيسية

يوضح الشكل ١٩ - ٨ هذه القاعدة . باستعمال اليد اليمنى نجد ان أصابع اليد المفتوحة ستشير في اتجاه خطوط المجال المغناطيسي وتثبت اليد بحيث يكون الإبهام مشيرا الى الاتجاه الذي يسرى فيه التيار داخل السلك . وحين يتم هذا سيكون اتجاه القوة المؤثرة على السلك هو الذى تدفع اليه راحة اليد . في الموقف الموضح في شكل ١٩ - ٨ تشير أصابع اليد اليمنى الى اليسار ، ويتجه الإبهام الى أعلى أما القوة المؤثرة على السلك فتتجه خارجة من الصفحة .



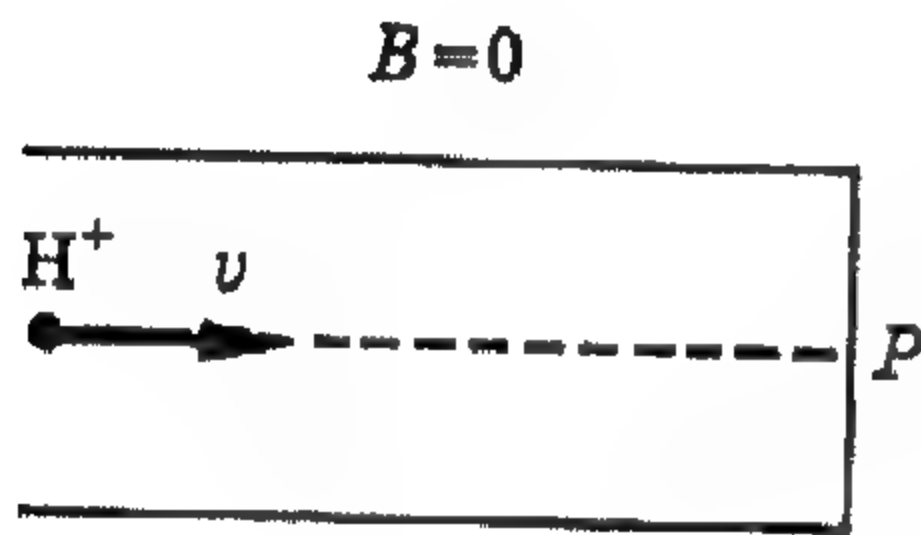
شكل ١٩ - ٨

عند استخدام قاعدة اليد اليمنى تشير الأصابع في اتجاه B ويشير الإبهام في الاتجاه العام للتيار I ، أما راحة اليد فتدفع في اتجاه F

لا يجب أن يكون في هذا الأمر أى خلط . فخط متجه المجال B وخط السلك يحددان معا مستوى (وهو مستوى الصفحة في حالة الشكل ١٩ - ٨) وتكون القوة دائما عمودية على هذا المستوى وطالما عرفت هذا فان التخمين الصرف يتيح لك فرصة مقدارها خمسون في المائة لكى تحصل على الاتجاه الصحيح للقوة التى إما أن تكون خارجة أو داخلية من أحد جوانب المستوى . لمعرفة الاختيار الصحيح ، استعمل القاعدة المبينة في شكل ١٩ - ٨ . اتجاه القوة في الشكل ١٩ - ٨ يكون نحو القارئ ، أى خارجا من الصفحة . باستخدام نفس القاعدة نجد أن اتجاه القوة في الشكل ١٩ - ٧ يكون الى داخل الصفحة .

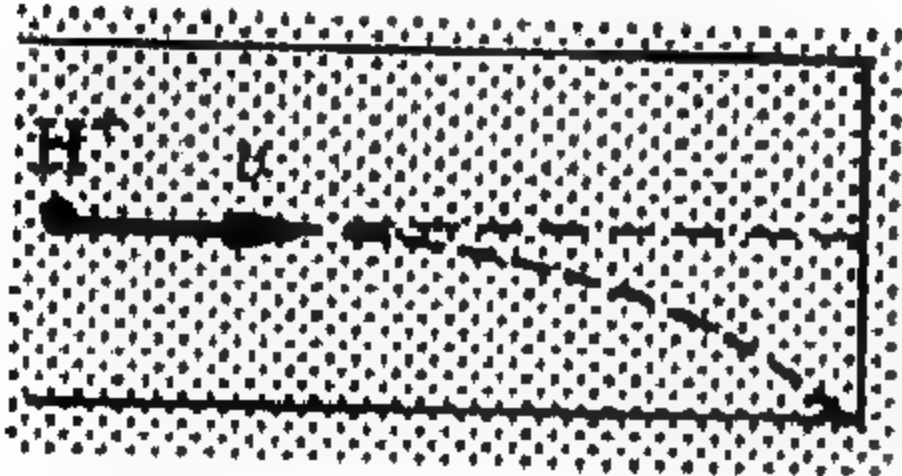
شكل ١٩ - ٩

تتبع البروتونات قوسا من دائرة حين تحرف في مجال مغناطيسى منتظم ، في (ب) تشير النقط الى أن B يتجه خارجا من الصفحة



(أ)

B خارجا من الصفحة



(ب)

١٩ - ٥ القوى المؤثرة على شحنات متحركة

ان التيار الكهربائى هو نتيجة لحركة الجسيمات المشحونة ، والسلك الذى يحمل تيارا يتعرض لقوة في مجال مغناطيسى . فهل من الضروري ، حقيقة ، أن توجد هذه الجسيمات داخل السلك حتى يتعرض لتلك القوة من جانب المجال المغناطيسى ؟ وعلى ما يبدو فلو أن القوة أثرت مباشرة على ناقلات الشحنة ، لتعرضت هذه لقوة حتى في حيز مفتوح في منطقة يوجد فيها مجال مغناطيسى . والحقيقة ان هذا ما يحدث فعلا .

لو أن جسيما موجب الشحنة مثل نواة الايدروجين أى البروتون عجل خلال فرق للجهد داخل أنبوبة زجاجية مفرغة ، فانه ينتقل في الأنبوبة حتى يصطدم بنهايتها كما هو مبين في الشكل ١٩ - ٩. ويمكن رؤية نقطة الاصطدام P كبقعة مضيئة على الزجاج لو أن نهاية الأنبوبة كانت مغطاة بمادة فلورية . (تنتج أنبوبة التليفزيون صورتها عندما تصطدم الالكترونات بستار فلورى عند طرف الرؤية . سنعتبر البروتون موجب الشحنة بدلا من الالكترون سالب الشحنة لأننا قد عرفنا التيار بدلالة سريان الشحنة الموجبة) .

افترض الآن أن القطب الشمالى لمغناطيس قد وضع خلف الأنبوبة بحيث يكون المجال خارجا من الصفحة كما يبين ذلك الشكل ١٩ - ٩ ب (تمثل النقط - كما ذكرنا من قبل - أسهما خارجة في اتجاهك بينما تمثل الصليبان أسهما مبتعدة) . وسنجد أن البقعة المضيئة عند نهاية الأنبوبة سوف تتحرك الى موضع مثل Q . لقد انحرف البروتون بواسطة المجال المغناطيسى ومن ثم أصبح لدينا برهان عملى على حقيقة أن الجسم المشحون اذا تحرك في مجال مغناطيسى فانه يتعرض لقوة .

وفضلا عن هذا تكون القوة المؤثرة على جسم موجب الشحنة متعامدة مع كل من اتجاه المجال واتجاه حركة الجسم . بفحص الشكل ١٩ - ٩ ب يتبين أن التيار الذى يسرى الى اليمين سينحرف ايضا الى أسفل ، وليس هذا بمستغرب في ضوء حقيقة أن التيار التقليدى هو سريان للشحنات الموجبة .

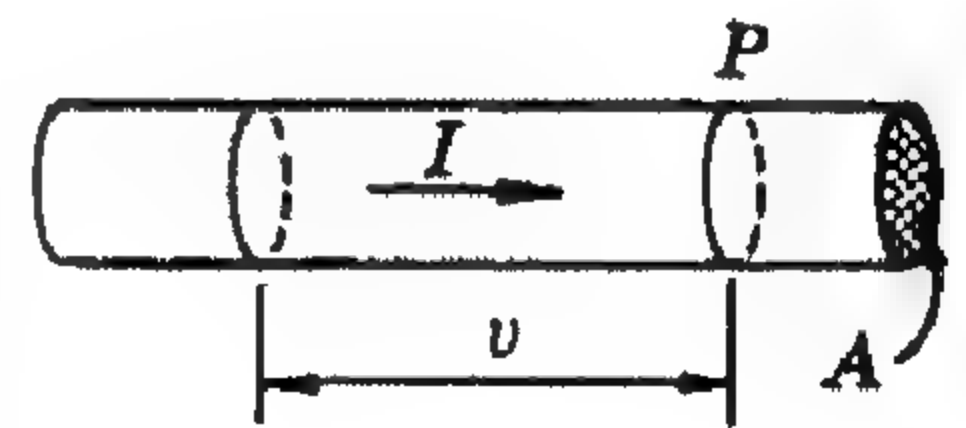
اذا أجريت التجربة مرة أخرى ولكن بقذف الكترونات داخل الأنبوبة لوجدنا أن الالكترونات ستتحرف الى أعلى بدلا من أسفل ، أى أن القوة المؤثرة على جسيمات سالبة الشحنة متحركة تكون في اتجاه معاكس للقوة المؤثرة على جسيمات موجبة . وبناء على ذلك فلا حاجة بنا لتعلم قواعد جديدة لتحديد اتجاه القوى المؤثرة على شحنات متحركة في مجال مغناطيسى وعلمنا فقط أن نعتبر الشحنات المتحركة كتيار يسرى في اتجاه الحركة ثم نستخدم امتداد قاعدة اليد اليمنى لإيجاد اتجاه القوى المؤثرة على التيار . لو كان الجسم موجبا فانه ينحرف في نفس الاتجاه ولو كان سالبا لانحرف في الاتجاه المعاكس .

اتجاه القوة المغناطيسية
شحنات متحركة

يمكن إيجاد مقدار القوة المؤثرة على شحنة متحركة مباشرة باستخدام معادلة القوة المؤثرة على تيار ،

$$F_{\text{wire}} = B_{\perp} IL$$

اعتبر الآن السلك المين في شكل ١٩ - ١٠ يسرى التيار I الى اليمين ويمكننا اعتبار التيار على أنه حركة الجسيمات موجبة الشحنة . لكل جسيم شحنة مقدارها q وسرعة متوسطة v كم من الشحنات سيمر بالنقطة P مخترقا المساحة المعطاة في الثانية ؟



سنقوم كل شحنة حرة على بعد v الى اليسار من P بالوصول الى P في ثانية واحدة $1s$ (تذكر أن v هي المسافة المقطوعة في ثانية واحدة) . لو كان هناك n شحنة حرة في الطول v من السلك ، فإن n من الشحنات سوف تمر بالنقطة P في $1s$. ولكن حسب تعريف التيار على أنه الشحنة المارة بنقطة في الثانية نجد أن

$$I = nq$$

شكل ١٩ - ١٠
ستمر كل الشحنات في
الطول v خلال المساحة عند
 P في ثانية واحدة

ولكن القوة المؤثرة على هذه الشحنات n ستكون هي بالضبط القوة المؤثرة على ذلك الطول من السلك الذى يحتوى عليها ، والطول L محل السؤال هو بالضبط v فى المقدار وذلك لأن الشحنات تنتقل مسافة قدرها v فى الثانية . وعلى هذا

$$F_{\text{charge}} = \frac{F_{\text{wire}}}{n} = \frac{B_{\perp} I L}{n}$$

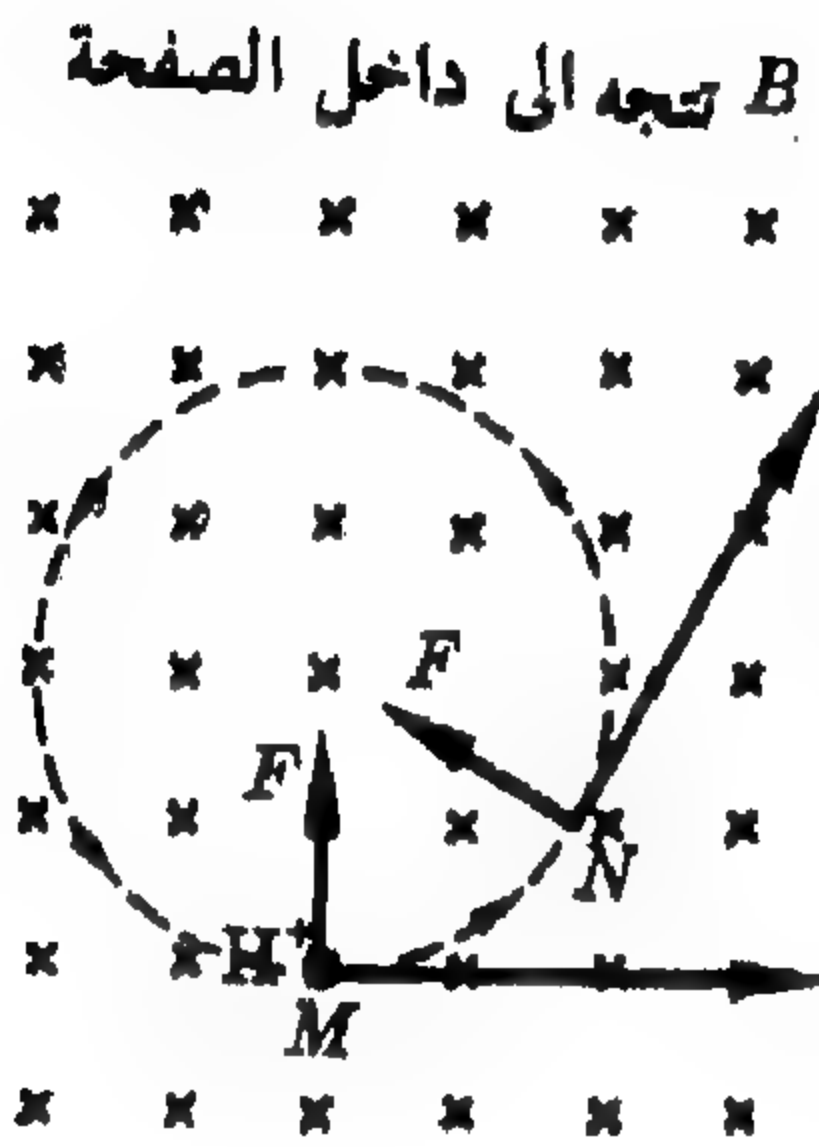
أو ، بعد التعويض عن قيمة I ، L

$$F_{\text{charge}} = B_{\perp} q v$$

القوة المؤثرة على شحنة متحركة

تذكر أن هذه القوة عمودية على اتجاه الحركة وكذا على اتجاه B وتذكر أيضا أن B_{\perp} هى مركبة B العمودية على v

مثال توضيحي ١٩ - ٢ : بروتون متحرك بسرعة 10^3 m/s يدخل منطقة يكون فيها المجال المغناطيسى $B = 0.020 \text{ T}$ فإذا كانت B, v متعامدين فصف حركة البروتون .
طريقة الحل : يوضح الشكل ١٩ - ١١ الموقف المذكور . حين يكون الجسم عند النقطة M فإن القوة تكون فى الاتجاه المئين ، أى أن البروتون ينحرف إلى أعلى ، ولكنه حين يصل إلى النقطة N تكون القوة أيضا عمودية على v وتأخذ الآن اتجاهها جديدا كما هو موضح . من الواضح أن القوة F ستجبر الجسم على الحركة فى مسار دائرى نصف قطره r . إذا قذف جسم مشحون عموديا على مجال مغناطيسى منتظم فإنه يتبع مسارا دائريا . وبما أن القوة تكون دائما عمودية على v فلا شغل يبذل على الجسم لأن الحركة لن تكون ابدا فى اتجاه القوة .



شكل ١٩ - ١١

ينحرف البروتون فى مسار دائرى بواسطة المجال المغناطيسى .

تقوم القوة المغناطيسية F بتوفير تسارع الجذب المركزى المطلوب للامساك بالبروتون فى مسار دائرى . وتكون معادلتنا لهذه المسألة هى : $F = ma$
القوة المغناطيسية = (الكتلة) (تسارع الجذب المركزى) .

$$B_{\perp} q v = \frac{m v^2}{r}$$

وباستخدام الأرقام المعطاه يمكننا إيجاد نصف قطر المسار r فيكون لدينا

$$r = \frac{m v}{B_{\perp} q} = \frac{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(10^5 \text{ m/s})}{(0.020 \text{ Wb/m}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})} = 5.2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

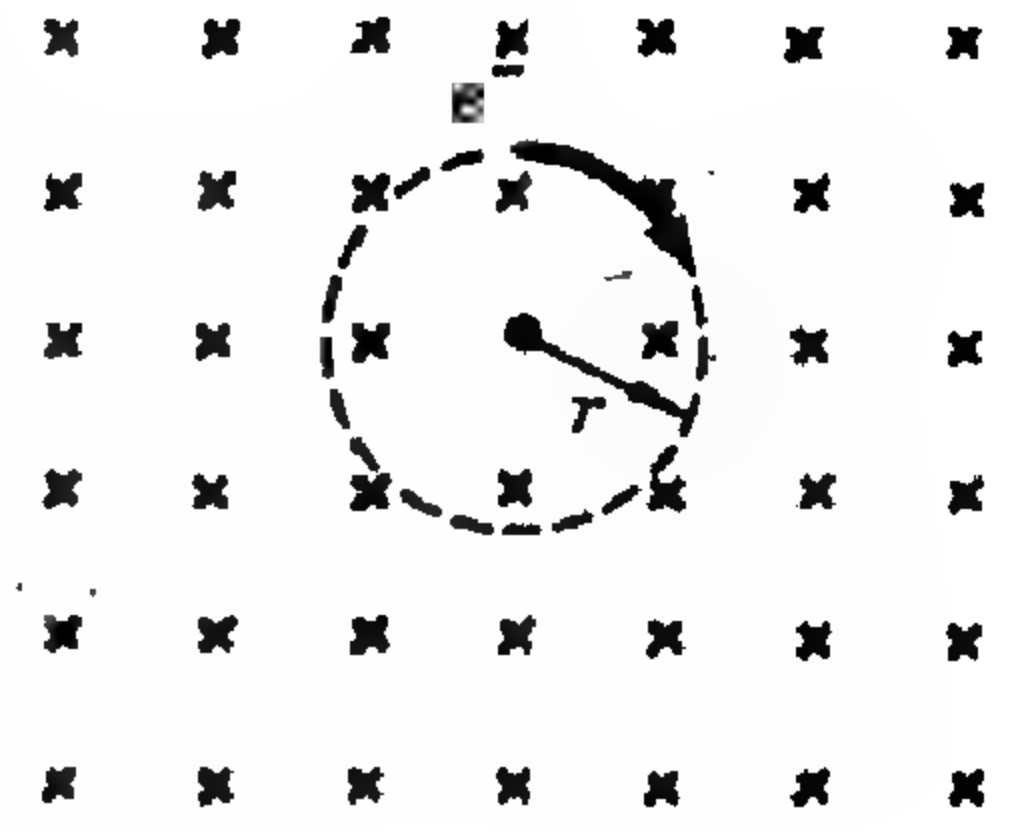
أو

$$r = 5.2 \text{ cm}$$

ما هو فرق الجهد الذى انحدر فيه هذا البروتون ؟ ما هو المسار الذى يمكن أن يسلكه الكترون بدلا من البروتون ؟

١٩ - ٦ تعيين e/m

ناقشنا في القسم السابق حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي . ومن أهم المعلومات المتعلقة بطبيعة الالكترونات ما أمكن الحصول عليه بملاحظة حركتها في مجال مغناطيسي . ولنوضح مبادئ القسم السابق بمحاولة معرفة كيف يمكن تعيين النسبة بين شحنة الالكترون e وكتلته m .



شكل ١٩ - ١٢

ينحرف الالكترون وهو سالب الشحنة في اتجاه معاكس لذلك الذي تنحرف فيه شحنة موجبة

افترض أن الالكترون يتحرك بسرعة v قد دخل مجالا مغناطيسيا كاليمين في الشكل ١٩ - ١٢ سيقوم الالكترون بوصف مسار دائري كما رأينا من قبل . لاحظ أنه حيث أن الجسيم سالب الشحنة ، فإن الدائرة التي يتحرك فيها الالكترون ليست كالتي يتحرك فيها البروتون كما في الشكل ١٩ - ١١ . ولما كانت القوة المغناطيسية Bev هي التي تخلق تسارع الجذب المركزي لذا يمكننا أن نكتب :

$$Bev = m \frac{v^2}{r}$$

أو

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} \quad ١٩ - ٣$$

وهذا يكون لدينا وسيلة لتعيين النسبة e/m عمليا . باستخدام الطرق الموصوفة فيما بعد فإن شدة المجال المغناطيسي B يمكن قياسها مثلما يمكن قياس نصف قطر المسار الدائري الذي يصفه الالكترون ، فاذا علمت v فإن e/m يمكن حسابها . ويمكن جعل مسار الجسيمات المشحونة مرئيا بعدد من الطرق وأحد هذه الطرق هو أن تكون هناك جزيئات هواء بداخل الانبوبة تحت ضغط منخفض جدا . ستصطدم بعض الجسيمات في الشعاع مع جزيئات الهواء وكما ستري في الباب السابع والعشرين سيطلق ضوء نتيجة للتصادمات ويصبح المسار الدائري لشعاع الجسيمات مرئيا على هيئة حلقة دائرية من الضوء ويمكن عندها قياس قطر هذه الحلقة بسهولة .

هناك طريقتان أساسيتان لقياس v . تعتمد أولى هذه الطرق على حقيقة أن الجسيم المشحون يكتسب طاقة مقدارها Vq حين ينحدر خلال فرق للجهد مقداره V ، ومن ثم اذا عرفنا فرق الجهد الذي يتسارع فيه الالكترون منذ البداية فانه يمكننا أن نكتب

$$Ve = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{أو} \quad v = \sqrt{\frac{2Ve}{m}}$$

وبالتعويض منها في المعادلة (١٩ - ٣) نحصل بعد التبسيط على :

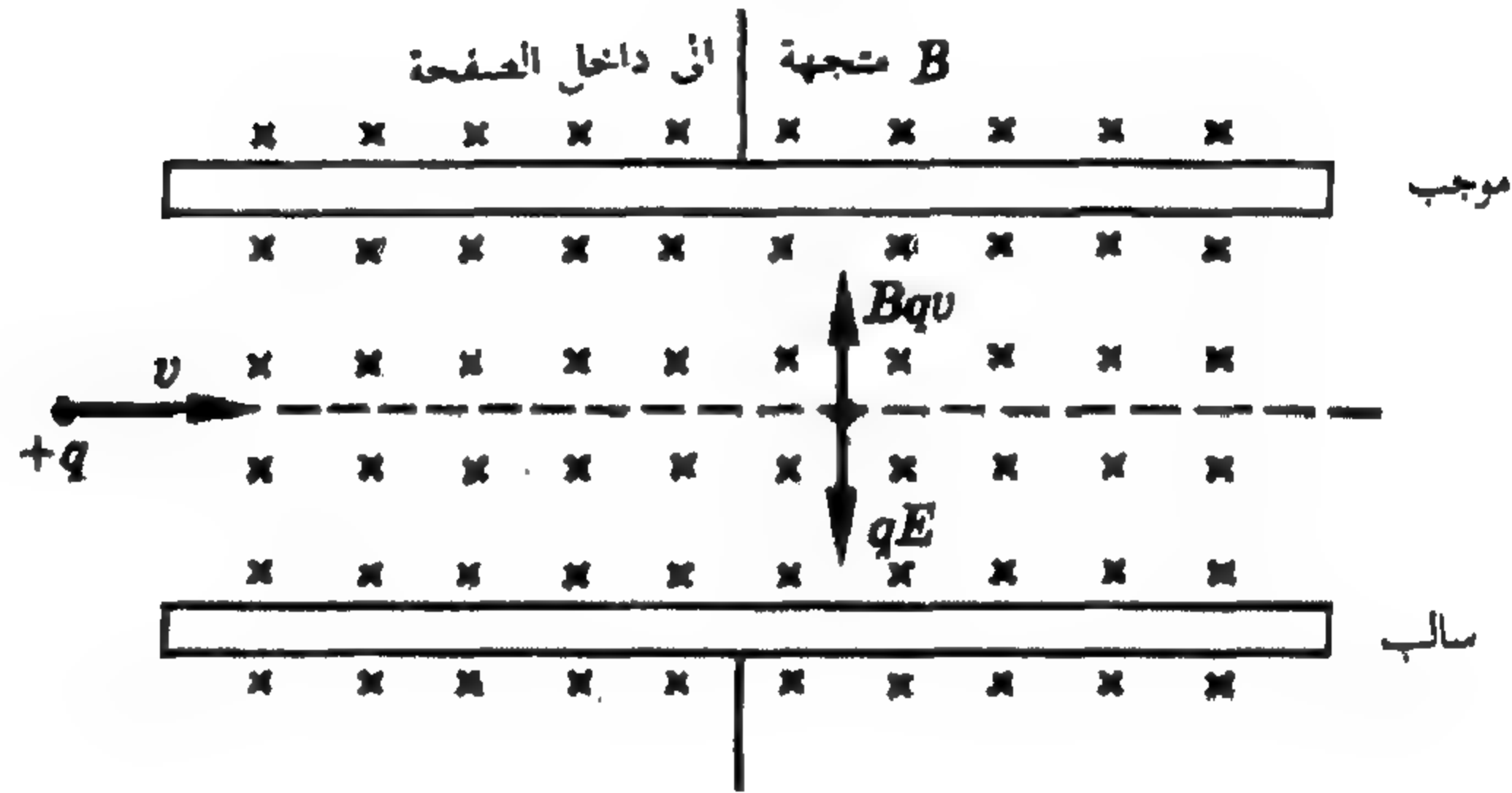
$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2}$$

لاحظ اننا نحتاج الآن الى فرق الجهد V التى تتسارع فيه الالكترونات بالاضافة الى قيمة r/B لكى نقدر قيمة النسبة e/m للالكترون التى وجد انها تساوى $1.7588 \times 10^{11} \text{ C/kg}$.

هناك طريقة أخرى أكثر دقة لقياس السرعة يستخدم فيها منتقى السرعات للجسيم وهذا الجهاز موضح تخطيطيا فى الشكل ١٩ - ١٣ . يقوم لوحان متوازيان لمكثف بتوليد مجال كهربائى E يؤثر بقوة qE الى أسفل على الجسيم الموجب كما هو مبين . ويقوم المجال المغناطيسى المبين B أيضا بالتأثير بقوة الى أعلى على نفس الجسيم الموجب وهذه القوة هى Bqv فاذا ضبط فرق الجهد عبر اللوحين بشكل صحيح فان مقدار E يكون بحيث أن :

$$Bqv = qE$$

شكل ١٩ - ١٣
فى جهاز منتقى السرعات
لاتمر بدون انحراف سوى
الجسيمات التى تكون القوة
الكهربائية qE لها مساوية
للقوة المغناطيسية Bqv



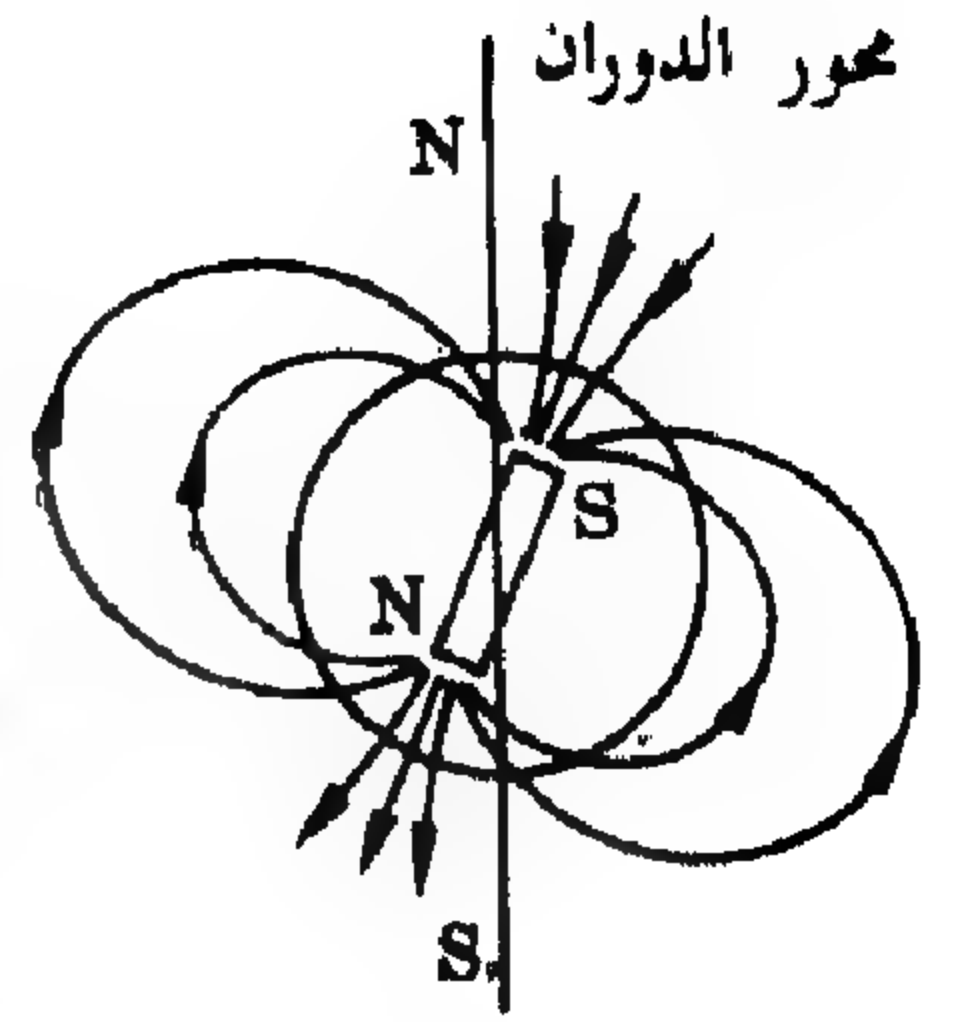
بحيث أن الجسيم لاينحرف . واذا حللنا المعادلة سعيا وراء v فان

$$v = \frac{E}{B}$$

لتعيين سرعة الجسيم v نحتاج الى ضبط فرق الجهد V على اللوح حتى يمر الجسيم بدون انحراف خلال المجالين المتقاطعين الكهربائى والمغناطيسى . بمعرفة $E = V/d$ ، حيث d هى المسافة بين اللوحين فإن v يمكن حسابها من العلاقة السابقة . إذا عرفت v فإن تجربة واحدة يتم فيها انحراف الجسيم فى مجال مغناطيسى فقط سوف تسمح بحساب q/m من المعادلة (١٩ - ٣) . هل يمكنك اثبات أن المناقشة السابقة لمنتقى السرعات باستخدام شحنات موجبة تنطبق بنفس الطريقة على الالكترونات ؟

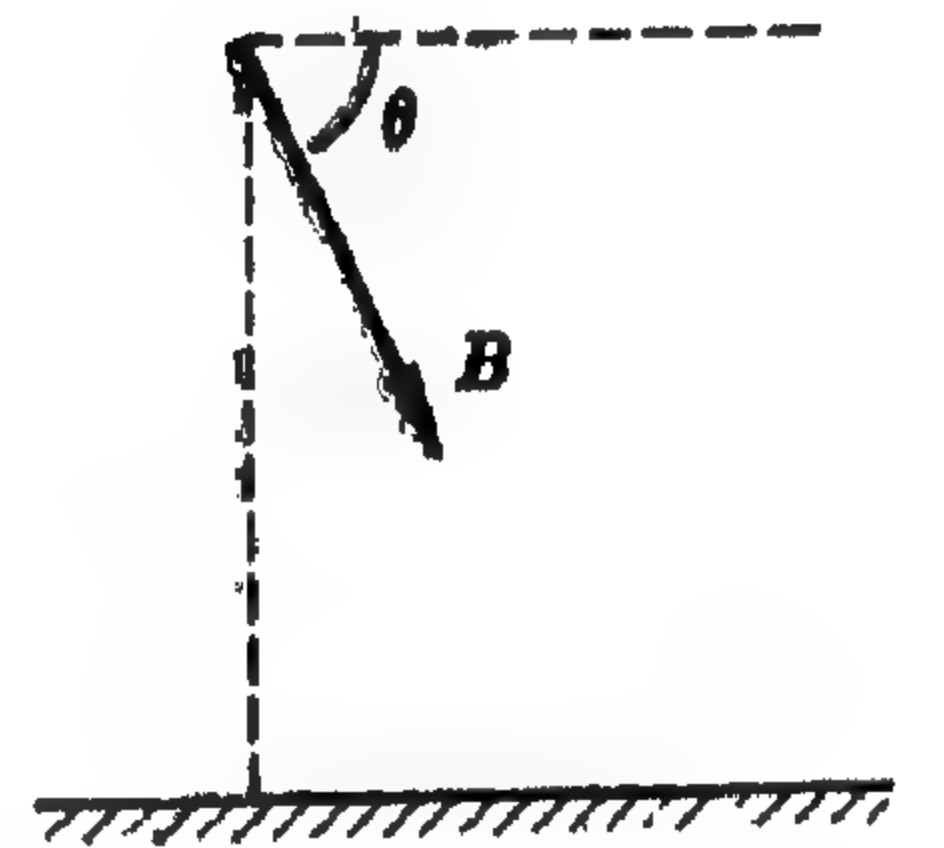
١٩ - ٧ : المجال المغناطيسى للأرض :

ان بعضا من التجارب التى وصفت فى القسم السابق يعمل على تعقيدها كون الأرض تمثل مغناطيسا هائلا ويوضح شكل ١٩ - ١٤ المجال المغناطيسى لها ، ويمكن فقط على وجه التقريب تحديد موقع الاقطاب داخل الأرض وهى مبينة فى الشكل للتوضيح . وتلاحظ هنا على وجه الخصوص أن الأقطاب الجغرافية ، حسبها يحددها محور دوران الأرض ، لا تنطبق مع الأقطاب المغناطيسية . كيف يمكن تحديد موضع القطب المغناطيسى عند الطرف الشمالى للأرض ؟ تستخدم بوصلة يكون قطبها الشمالى - حسب التعريف - هو طرف الابر الذى يشير الى الشمال وعلى هذا فان القطب الموجود عند الطرف الشمالى للأرض يجب أن يكون فعلا هو القطب الجنوبى للمغناطيس لانه يجذب القطب الشمالى لابر البوصلة . وهذه بطبيعة الحال هى النتيجة الحتمية لاختيارنا طرف المغناطيس الذى يتجه للشمال ، قطبا مغناطيسيا شماليا . وعلى الرغم من أن التعريف العادى للقطب الشمالى والجنوبى قد تسبب بعض الخلط الا أن هذا لايشكل أية صعوبة بالنسبة للطالب الماهر .



شكل ١٩ ١٤
لاتنطبق الاقطاب المغناطيسية
للأرض مع الاقطاب التى
يحددها محور دورانها .
وبالاضافة الى هذا فإن
القطب المغناطيسى القريب
من القطب الشمالى للأرض
هو فعلا قطب مغناطيسى
جنوبى

يكون المجال المغناطيسى للأرض موازيا - كما هو مبين فى الشكل (١٩ - ١٤) لسطح الأرض بالقرب من خط الاستواء فقط أما بالقرب من القطبين فان المجال يكون عموديا على الأرض تقريبا . والكميات المطلوبة لتحديد مجال الأرض فى بقعة معينة هى الاتجاه ومقدار هذا المجال . ومن المعتاد اعطاء المقدار وكذا زاوية الميل . وزاوية الميل مبينة فى الشكل (١٩ - ١٥) على أنها الزاوية θ أما قيمة B فتبلغ 10^{-4} wb/m^2 أو 1 G على سطح الأرض ..



١٩ - ٨ خطوط التدفق وكثافة التدفق

يوضح الشكل ١٩ - ١٦ المجال المغناطيسى بين قطبي مغناطيس على شكل U كالممثل فى الجزء (ب) من الشكل . ومن السهل ادراك هذا لو تذكرنا أن ابرة البوصلة تنتظم موازية لخطوط المجال وأن هذه الخطوط تنبع من القطب الشمالى . وكما ذكرنا فى حالة المجال الكهربائى فان كثافة الخطوط تعتبر مقياسا لشدة المجال ، وستفق - على الأقل للأغراض الحسابية - أن نرسم الخطوط بالطريقة التالية .

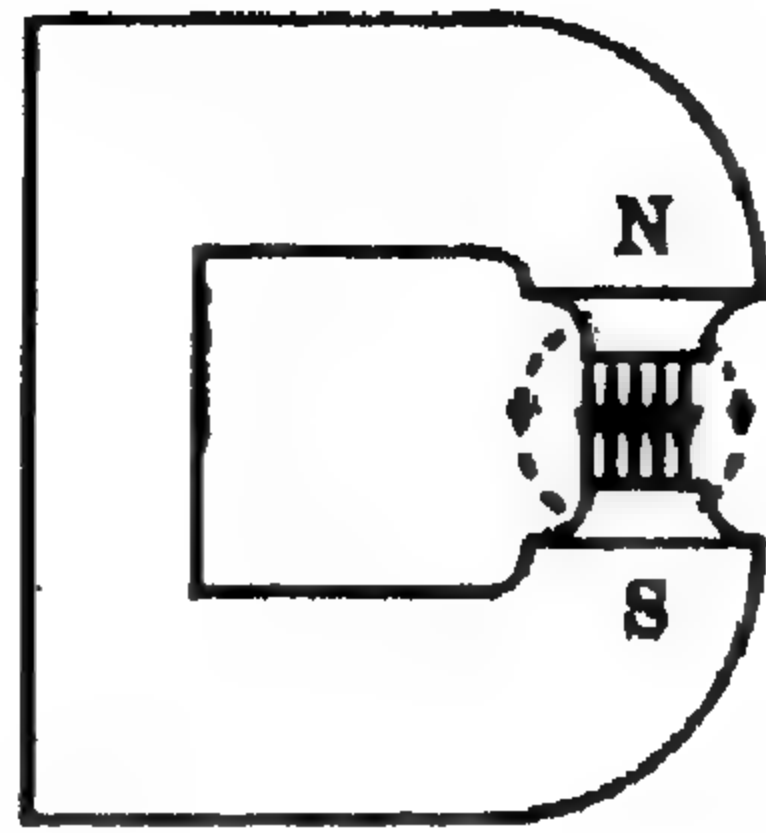
شكل ١٩ - ١٥
يوصف المجال المغناطيسى
عند نقطة ما على الأرض عن
طريق تحديد كثافة التدفق B
وزاوية الميل θ

اذا كان مقدار المجال المغناطيسى هو B فانتا سنرسم عددا من الخطوط مساويا B يمر خلال وحدة المساحات العمودية على المجال . على هذا ففى الشكل ١٩ - ١٦ اذا كانت مساحة الأقطاب هى A لزم أن ترسم عدد BA من الخطوط التى تخرج من القطب العلوى وتدخل فى السفلى ومع اهمال تأثير

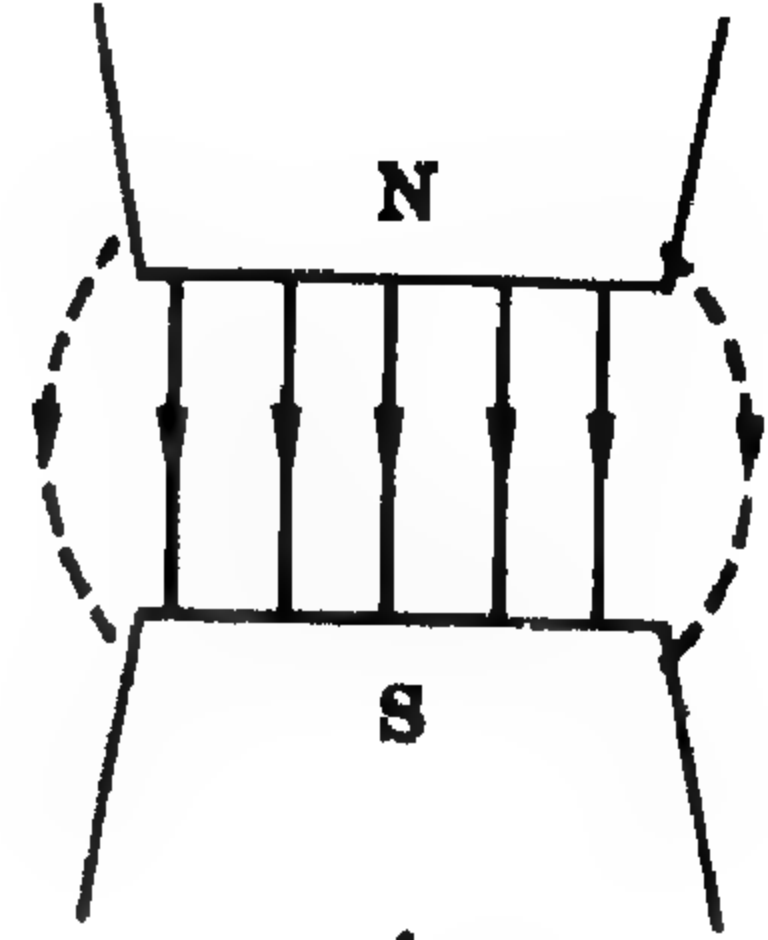
العلاقة بين خطوط المجال و θ

التهذب (. ويسمى المجموع الكلى للخطوط المارة خلال مساحة ما بالتدفق خلال هذه المساحة ويمثل بالحرف الاغريقى ϕ (فاى) . وعلى هذا يكون لدينا ،

$$\phi = B \cdot A$$



(ب)



(أ)

حيث قد استخدم الرمز B_{\perp} لتذكيرنا أنه يجب استعمال مركبة B العمودية على المساحة .

السبب في الاصرار على وجوب التعامد يظهر بسهولة في الشكل ١٩ - ١٧ ، ففي الجزء (أ) يكون عدد الخطوط المارة خلال المساحة هو بالضبط $\phi = BA$ ولكن في الجزء (ج) تمر جميع الخطوط متجنباً المساحة ولا يمر أحدها من خلال المساحة ولذا $\phi = 0$ ، والمساحة هنا موازية للخطوط أما الحالة المتوسطة فمن الصعب معالجتها وهنا يجب النص فقط على أن التدفق خلال المساحة يساوى حاصل ضرب A في مركبة B العمودية على المساحة .

وحدات B هي كما ذكرنا Webers/m^2 ولما كان التدفق عبارة عن حاصل ضرب B في المساحة لذا فوحدات التدفق تكون webers . ولما كانت B هي التدفق لوحدة المساحات فانها تسمى دائماً كثافة التدفق .

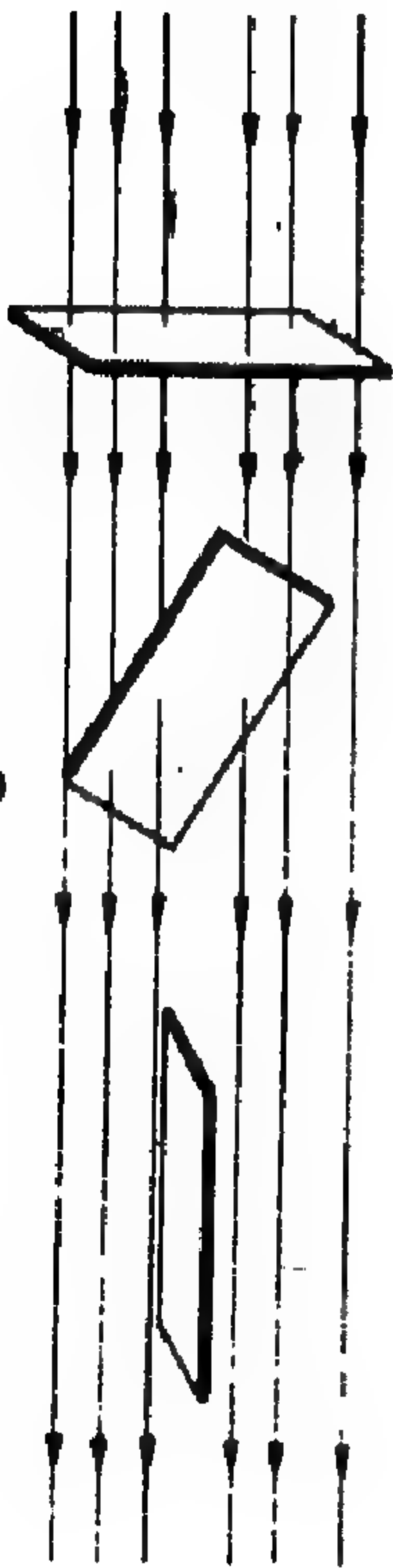
١٩ - ٩ قانون أمبير وحساب B

على الرغم من أننا قد أشرنا الى أن المجال المغناطيسى يتولد من التيار أو سريان الشحنات الا أننا لم نقم الى الآن بتقديم طريقة لحساب B بدلالة التيار . وعلى العموم يشكل حساب B خارج عروة تيار أو أى نظام معقد مشكلة رياضية صعبة ، على أنه في بعض الحالات الخاصة يكون الحساب سهلاً نسبياً كما سنرى .

لقد أمدتنا قاعدة اليد اليمنى بطريقة للحصول على الملامح الكيفية للمجال المغناطيسى خارج سلك يحمل تياراً . فنحن نعرف مثلاً أن مجالا مغناطيسياً يلتف حول

شكل ١٩ - ١٦

يصور الشكل (أ) المجال المغناطيسى بين قطبي المغناطيس المبين في الجزء (ب) . لم يتهذب المجال عند حافة المغناطيس ؟



(أ)

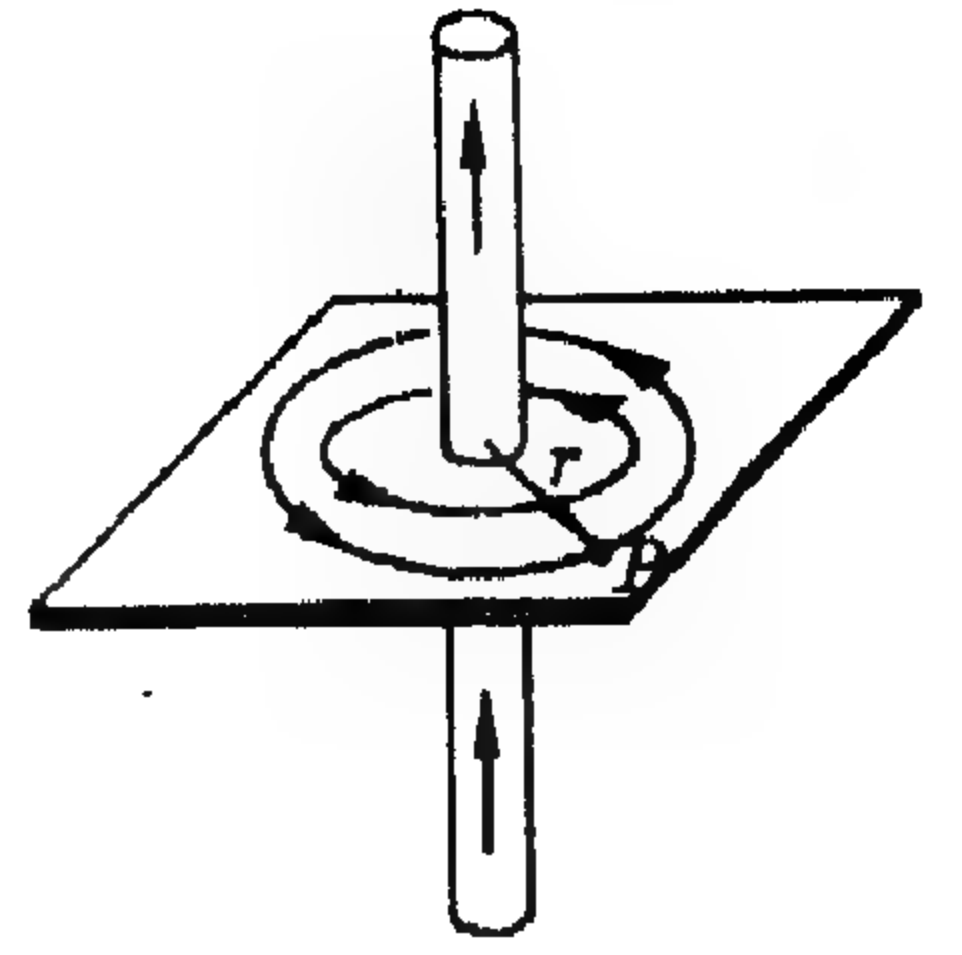
(ب)

(ج)

شكل ١٩ - ١٧

يمر الحد الأقصى من التدفق خلال مساحة ما حين تكون هذه المساحة كما في الوضع (أ) . ولا يمر تدفق على الإطلاق حين يكون اتجاه المساحة كما في (ج) .

سلك طويل مستقيم بالكيفية المبينة في الشكل ١٩ - ١٨ . وبالإضافة الى هذا يمكن التخمين بأن B تصير أقل في المقدار كلما بعدنا عن السلك . على أنه للحصول على القيمة الكمية لـ B فإن علينا أن نستفيد من العلاقة التي اكتشفها اندريه ماري أمبير (١٧٧٥ - ١٨٣٦) والتي يمكن تصورها على النحو التالي .



شكل ١٩ - ١٨
يحيط المجال المغناطيسي
بالسلك المستقيم الطويل
الذي يحمل تياراً

لقد كان معلوماً لأمبير من خلال العديد من التجارب أن مقدار شدة المجال المغناطيسي B على بعد r من سلك طويل يحمل تياراً I ، يتغير عكسياً مع r وطردياً مع I . وبالرموز .

$$B \propto \frac{I}{r}$$

ويمكن تعيين ثابت التناسب من التجربة وهو يمثل بالكمية $\mu_0/2\pi$ بحيث أنه يصبح لدينا

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

وذلك للحث المغناطيسي عند النقطة p في الشكل ١٩ - ١٨ . الكمية μ_0 تسمى الانفاذية المطلقة في الفراغ وقيمتها المضبوطة هي $4\pi \times 10^{-7} \text{ wb (A) (m)}$ كما سيتضح في الفصل الثاني والعشرين .

الانفاذية المطلقة للفراغ

بالنظر الى الشكل ١٩ - ١٨ نلاحظ ان مقدار B يجب أن يظل ثابتاً على دائرة متحدة المركز مع السلك وينتج هذا من حقيقة أنه لا توجد نقطة أكثر تفضيلاً على مثل هذه الدائرة ، وذلك لأن السلك نفسه دائري وموجود عند مركز الدائرة ولهذا فكل نقطة على الدائرة لا يمكن تمييزها عن جميع النقاط الأخرى على نفس الدائرة . ولهذا فإن B يجب أن تكون هي نفسها عند جميع نقاط الدائرة . اذا ضربت B الكائنة عند نصف القطر r في طول المسار الدائري الذي له نفس القطر (أي $2\pi r$ فإننا - بعد استعمال العلاقة التجريبية للمقدار B - نحصل على ،

$$(B)(2\pi r) = \mu_0 I$$

ولنحاول النص على هذه النتيجة بطريقة أخرى . نختار مساراً مقفلاً (وبالتحديد دائرة) يحيط بتيار I يعطينا حاصل ضرب طول هذا المسار في مقدار B الكمية $\mu_0 I$ كنتيجة . وهنا اغراء للتساؤل عن امكانية تعميم هذه النتيجة لمسار على هيئة مستطيل بدلا من دائرة . أو ربما حصلنا على اجابة بسيطة حتى في حالة استخدام مسار معقد على هيئة مضلع متعدد الجوانب يحيط بالسلك . ولقد استطاع أمبير أن يوضح أن

الأمر هي فعلا هكذا أى أن تعقد المسار الذى يحيط بالسلك الحامل للتيار I لاثوثر فى الحصول على نتائج بسيطة . وكل ما تحتاجه هو تفتيت المسار الى موجهاً قصيرة بحيث يكون متجه المجال المغناطيسى B ثابتاً فى كل منها . وبعد ذلك لو أن حاصل ضرب كل طول فى مركبة B الموازية لهذا الطول أخذ فإن مجموع كل هذه الحواصل يكون مساوياً $\mu_0 I$.

وقد احتوى اكتشاف أمبير فيما يعرف الآن باسم قانون أمبير للدوائر . وقبل أن نكتب القانون على صورة رياضية فلنحاول تطبيقه على مسار معقد كالمبين فى الشكل ١٩ - ١٩ . لقد تم تفتيت المسار الى عدد كبير من الأطوال القصيرة l_1, l_2, \dots, l_{100} حيث تعتبر عدد هذه الأطوال مائة بغرض المناقشة . وقد يكون علينا فعلا أن نستخدم عدداً أكبر وأطوالاً أقصر حتى لا تتغير قيمة B بشكل محسوس داخل كل طول . علينا الآن أن نأخذ الطول الأول l_1 ونضربه فى مركبة B الموازية له فى الموقع الخاص به ونرمز لهذا بالرمز $(IB_1)_1$ ثم نقوم بالمثل فى حالة القطعة الثانية ، الحاصل هو $(IB_1)_2$ وهكذا . والآن ينص قانون أمبير للدوائر على أن

$$(IB_1)_1 + (IB_1)_2 + (IB_1)_3 + (IB_1)_4 + \dots + (IB_1)_{100} = \mu_0 I$$

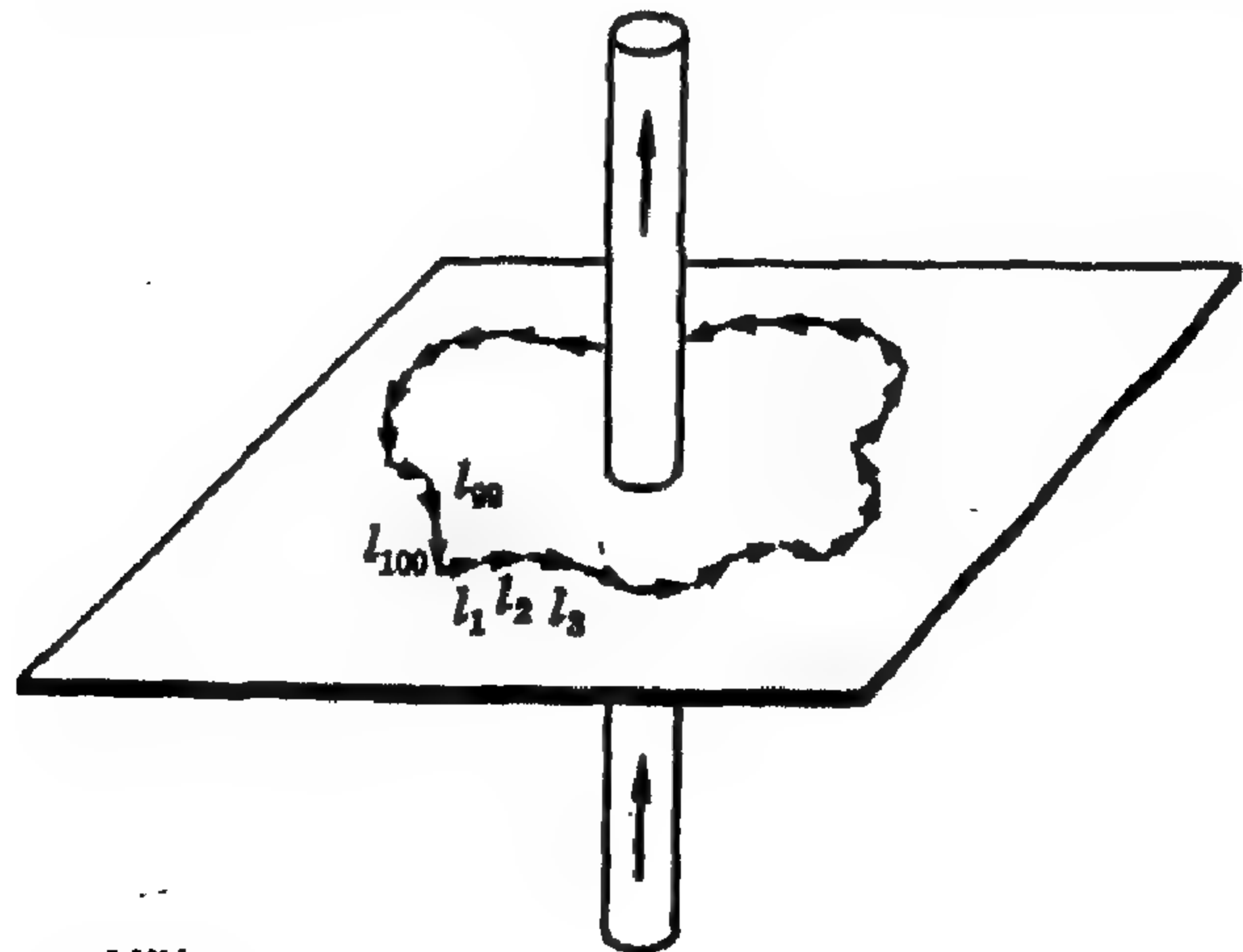
حيث $+$ + تمثل حدوداً أخرى فى المجموع .

ويمكننا كتابة المعادلة على صورة رمزية بالطريقة التالية

$$\sum (IB_1)_n = \mu_0 I \quad (١٩ - ٥) \quad \text{قانون أمبير للدوائر}$$

حيث يعنى الرمز $\sum (IB_1)_n$ أن نأخذ الحواصل المختلفة للكمية IB_1

حول المسار المقفل . وتعتبر المعادلة (١٩ - ٥) هى المنطوق الرياضى لقانون أمبير للدوائر ويجب تذكر أن عناصر الطول l يجب أخذها أصغر ما يمكن حتى تكون B ثابتة بشكل معقول على كل عنصر من عناصر الطول .



شكل ١٩ - ١٩
يستخدم المسار المقفل أو
العروة المتكونة من
الموجهاً المينة عند دراسة
قانون أمبير

سنحسب الآن كثافة التدفق B خارج سلك طويل مستقيم وذلك كمثال على استخدام هذا القانون . افترض اننا نريد إيجاد B عند النقطة P في الشكل (١٩ - ٢٠) . تفيدنا قاعدة اليد اليمنى أن B سوف تلتف حول السلك في اتجاه الأسهم ، كما أن مقدار B سيكون ثابتا في كل نقطة على الدائرة حيث أن هذه النقط متماثلة بالنسبة للسلك . ولإستخدام قانون أمبير سنبدأ باعتبار أن الدائرة في الشكل ١٩ - ٢٠ مكونة من عدد كبير ، وليكن ألف مقطع صغير أو متجه تمتد حول الدائرة . بكتابة المعادلة ١٩ - ٥ نجد أن

$$(IB_{||})_1 + (IB_{||})_2 + (IB_{||})_3 + \dots + (IB_{||})_{1000} = \mu_0 I$$

حيث تعنى + ... + مرة أخرى كل الحدود الداخلة في عملية الجمع ولم تكتب . ولكننا رأينا أن B تلتف حول السلك بنفس الطريقة التي تفعلها هذه المتجهات الصغيرة . وبالإضافة الى هذا فإن B ثابتة عند كل موقع بالعروة . ومن ثم فكل قيم $B_{||}$ متساوية فيما بينها وتساوى القيمة الكلية لـ B عند النقطة P حيث أن B تلتف في مستوى مواز للعروة. ونتيجة لها تصبح المعادلة السابقة بعد استخلاص قيمة $B_{||}$ أو B

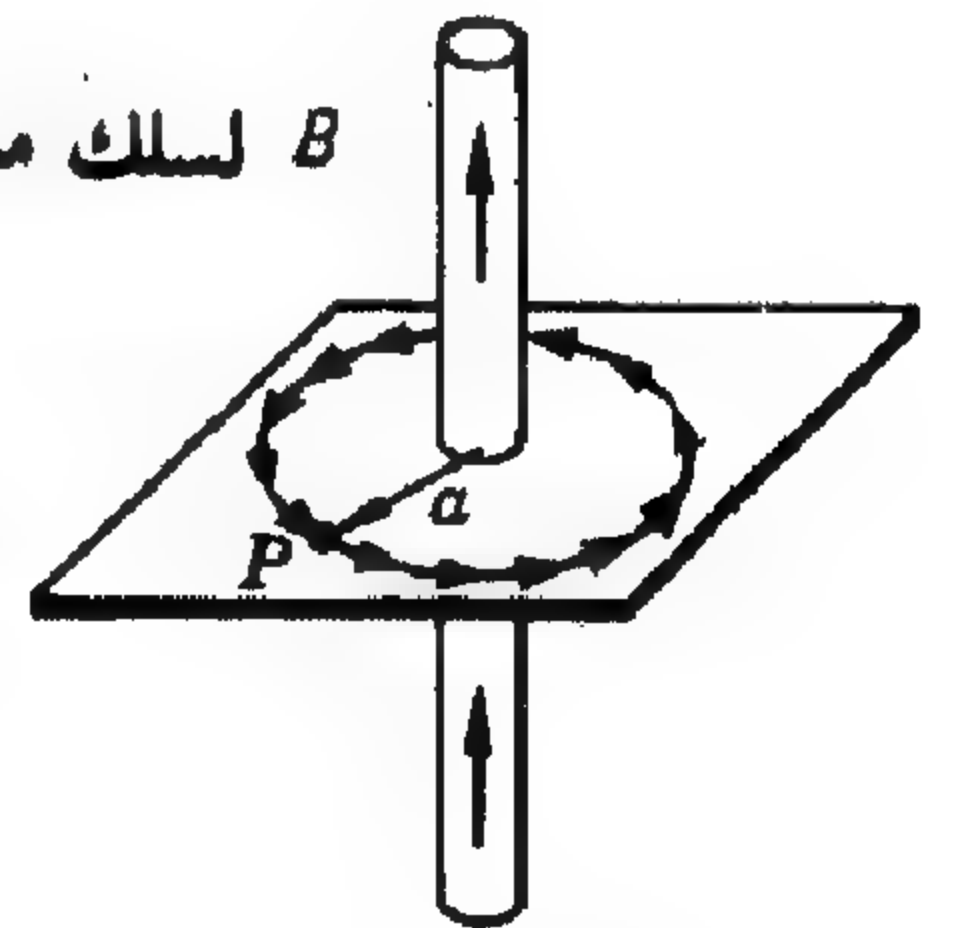
$$B(l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_{1000}) = \mu_0 I$$

ولكن مجموع الأطوال l_1 والـ هو بالضبط طول المسافة حول الدائرة ، $2\pi a$ ، ومن ثم نجد .

$$(B)(2\pi a) = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

B لسلك مستقيم



وهي النتيجة الموجودة بالتجربة كما ذكر من قبل .
مثال توضيحي ١٩ - ٢٠ اوجد قيمة B عند نقطة تبعد 5cm من سلك يحمل تيارا قدره 20A

طريقة الحل : باستخدام المعادلة (١٩ - ٦) نجد أن

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(20)}{(2\pi)(0.05)} = 0.80 \times 10^{-4} \text{ T} = 0.80 \text{ G}$$

شكل ١٩ - ٢٠

تكون المتجهات عروة مقفلة متحدة المركز مع السلك وتعتبر ثابتة على هذا المسار

عليك وضع الوحدات في المعادلة السابقة والتحقق من الوحدات التي في الإجابة .
 يبلغ المجال عند هذه المسافة من السلك ما يقارب مجال الأرض من حيث الشدة .
 اذا اعتبرنا هذا فهل يمكنك التفكير في أية مشكلة عملية كان يمكن أن يقابلها
 اورستد في الحصول على شكل المجال حول سلك ؟

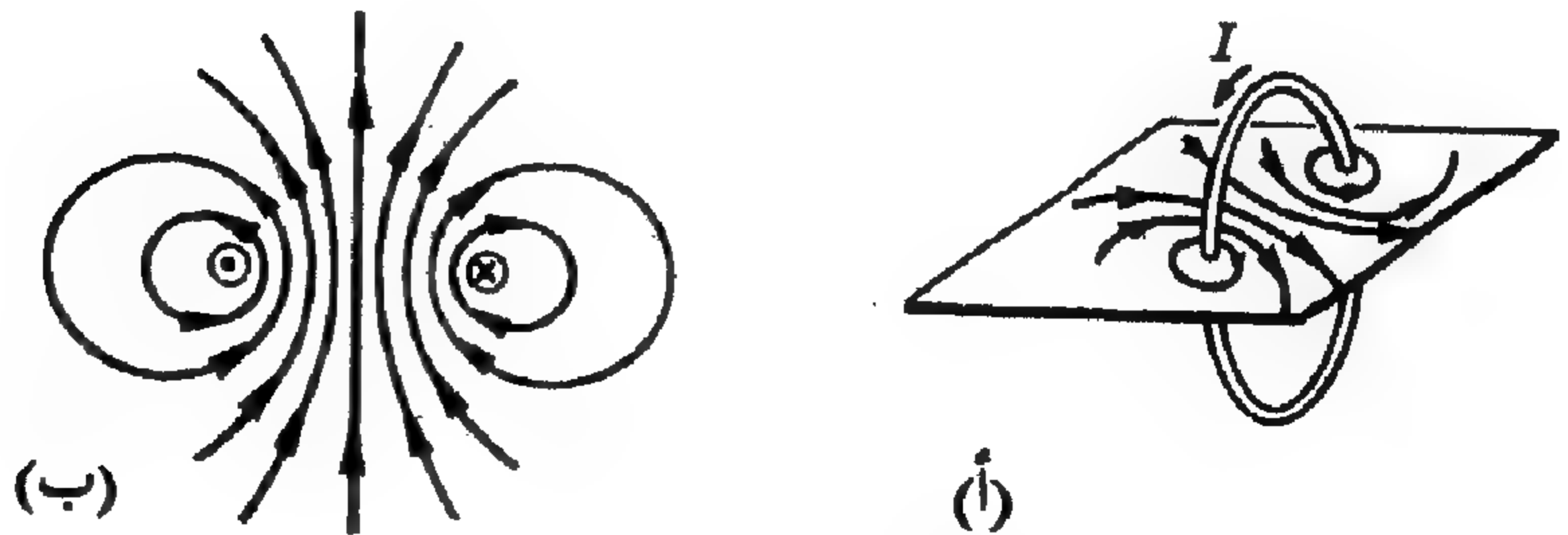
١٩ - ١٠ المجال المغناطيسي لعروة دائرية

افترض أن سلكاً طويلاً يحمل تياراً قدره I قد حنى على شكل دائرة كالتى في الشكل
 ١٩ - ٢١ أ . يجب أن يلتف المجال القريب من السلك حوله كما فعل في حالة السلك
 المستقيم ولكن شكل المجال سيكون مشوهاً بدرجة بالغة عند مسافة ما من السلك كما
 هو مبين بطريقة أكثر وضوحاً في الشكل ١٩ - ٢١ ب حيث يرى مقطع مستعرض
 للعروة . يشير الرمز (.) الى أن السلك يحمل تياراً في اتجاه خارج من الصفحة ،
 بينما الرمز (X) الى تيار يدخل في الصفحة . (تذكر أن هذه الرموز قد جاءت من
 الطرف المدبب للسهم وذيله ذى الريش) .

يبدو أن حساب B في هذه الحالة سيكون معقداً لأقصى حد فيما عدا عند نقطة
 على محور العروة . ولا يمكننا استعمال قانون أمبير بسهولة لأنه لا يوجد مسار واضح في
 شكل ١٩ - ٢١ تكون فيه قيمة B ثابتة أو معلومة . وعلينا أن نستخدم طرقاً أخرى
 في هذه الحالة ، وهذه الطرق تنطوي على حساب التفاضل والتكامل ، ولذا فإننا
 سنعالج هذا المثال بطريقة كيفية فقط .

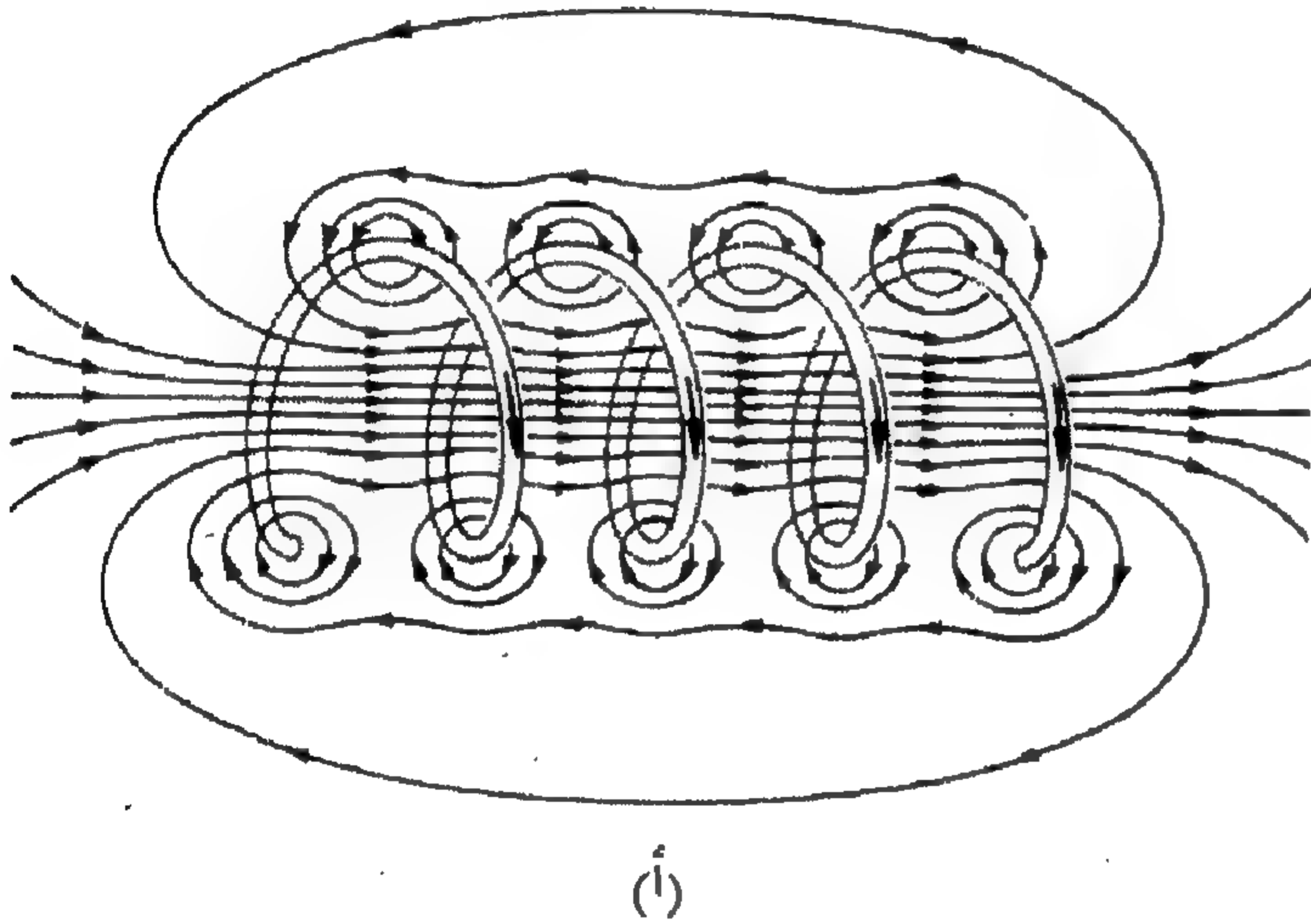
لو أن لدينا عدداً من العرى لسلك وملفوفة بأحكام معا ، فإن صورة المجال ستبدو
 كما في الشكل ١٩ - ٢١ تماماً . لكن العروة المبيتة يمكن أن تفسر على أنها مكونة من
 عدة لفات أو عرى من السلك . لو أن التيار المار في السلك كان I لكل من العروة
 المنفردة والملف الذى يحوى N عروة لكان المجال المغناطيسى B لهذا الملف أكبر N مرة
 من ذلك الذى للعروة المنفردة .

شكل ١٩ - ٢١
 منظران للمجال المغناطيسى
 حوله عروة تحمل تياراً

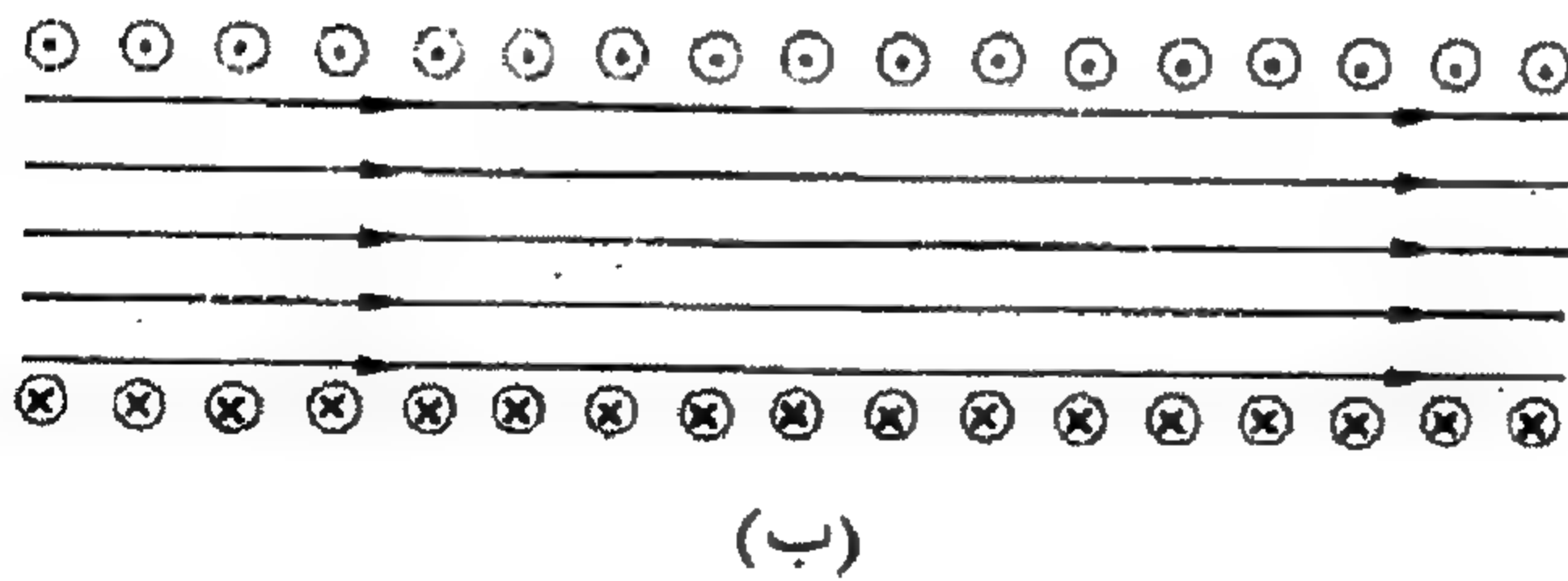


١٩ - ١١ الملف اللولبي

الملف اللولبي هو ملف اسطوانى طويل من السلك . ولتوضيح المجال المغناطيسى داخله فان الشكل (١٩ - ١٢٢) يبين ملفا لولبيا سائبا بشكل أكبر من المعتاد ، أما المقطع المستعرض للملف لولبى شائع وملفوف بإحكام فيصوره الشكل ١٩ - ٢٢ ب. ويلاحظ كيف ان المجال داخل الملف اللولبى يتجه مستقيما خلاله وفضلا عن ذلك يكون المجال داخل الملف اللولبى الطويل الملفوف بإحكام أشد بكثير بداخله عن خارجه . لكثير من الاغراض العملية يمكن اعتبار المجال داخل الملف اللولبى الطويل على أنه مواز لمحوره ، أما خطوط التدفق خارج الملف اللولبى فتنشر على هيئة مروحية فى الفضاء بحيث تكون متباعدة جدا عن بعضها البعض ، مشيرة بذلك الى أن المجال ضعيف للغاية خارج الملف اللولبى .



شكل ١٩ - ٢٢
يكون المجال منتظما بالضرورة
داخل ملف لولبى



سيكون من الممكن حساب قيمة B داخل ملف لولبى طويل وذلك باستخدام قانون أمبير . اعتبر المسار ، أو العروة ، $abcd$ فى الشكل ١٩ - ٢٣ . فى هذه الحالة يصبح قانون أمبير كما يلى

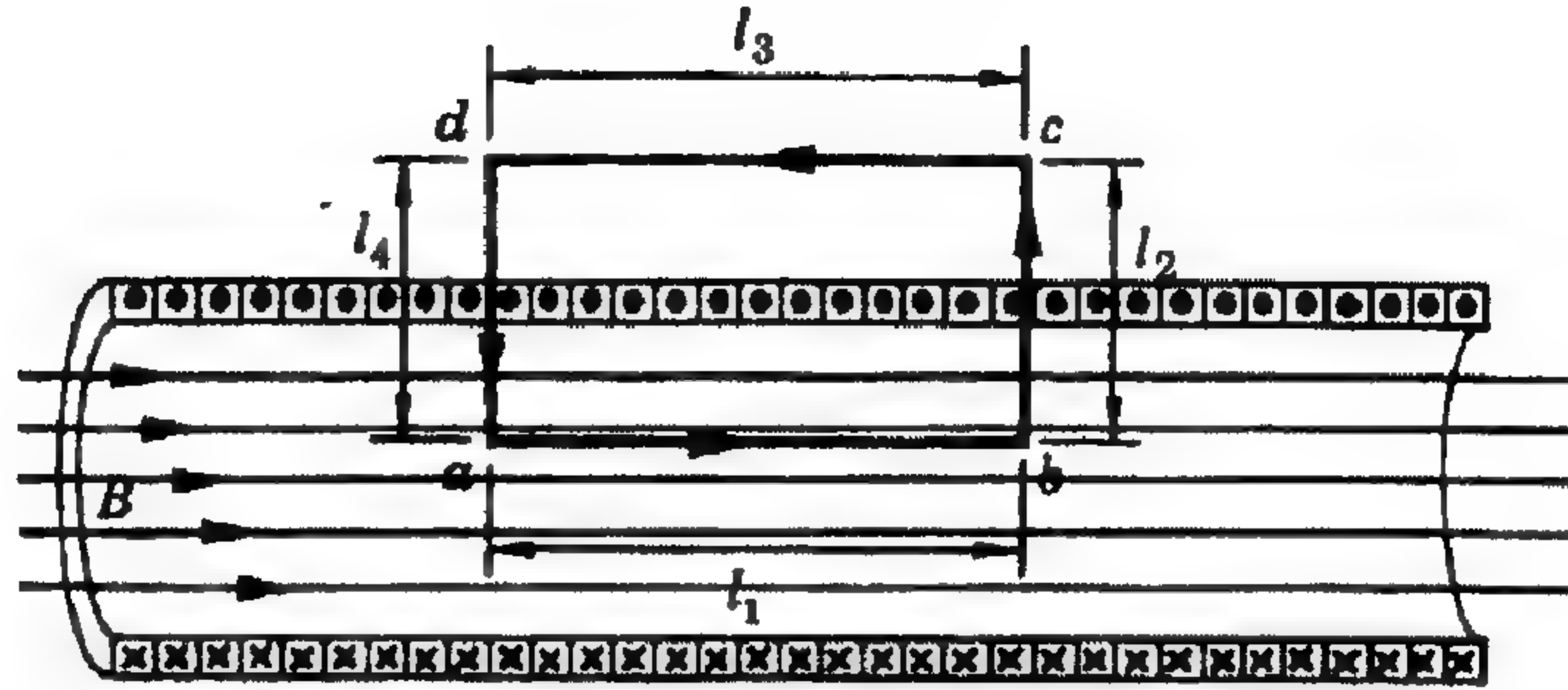
$$(\mu_0) (\text{التيار المحاط}) = (IB_1)_1 + (IB_1)_2 + (IB_1)_3 + (IB_1)_4$$

تكون B في داخل الملف اللولبي موازية للطول l_1 ولذا ،

$$(IB_1)_1 = l_1 B$$

وقد رأينا بالفعل أن B خارج الملف اللولبي صغيرة جدا خاصة اذا كان الملف طويلا جدا ولذا يمكننا وضعها صفرا بالتقريب . وعليه فان ،

$$(IB_1)_3 = 0$$



شكل ١٩ - ٢٣
يمكن إيجاد قيمة B داخل
الملف اللولبي وذلك بتطبيق
قانون أمبير للدائرة على المسار
abcd

وفضلا عن ذلك تكون B عمودية على كل من l_2, l_4 داخل الملف اللولبي وتكون صفرا خارجة ، لهذا

$$(IB_1)_2 = (IB_1)_4 = 0$$

ويختصر في هذه الحالة قانون أمبير ليصبح :

$$l_1 B = (\mu_0) (\text{التيار المحاط})$$

اذا كان هناك n عروة من السلك في وحدة الاطوال من الملف اللولبي فاننا نكون قد أحطنا $n l_1$ عروة بهذا المسار . (وهذا الرقم هو فعلا 13 في الشكل ١٩ - ٢٣)
تحمل كل عروة تيارا قدره I يتجه خارجا من المساحة الموصوفة بهذا المسار . ويكون
التيار المحاط هو $n l_1 I$ تماما . ومن ثم ،

$$l_1 B = \mu_0 n l_1 I$$

(١٩ - ٧) B في ملف لولبي

$$B = \mu_0 n I$$

داخل ملف لولبي طويل

لاحظ ان B لا تعتمد على الموضع داخل الملف اللولبي وعلى هذا فالجبال
داخل الملف اللولبي ليس موازيا لمحوره فحسب بل إنه منتظم ايضا . وهذا
حقيقي بالطبع لتلك النقط البعيدة عن الأطراف فقط .

١٩ - ١٢ الملف الحلقي

سنعتبر الآن الملف الحقيقي كمثال نهائى . وهذا الملف ليس الا ملفا لولبيا حنى على شكل دائرة بحيث لم تعد له أطراف . والشكل ١٩ - ٢٤ يبين رسما تخطيطيا للملف الحلقي . ومن الطبيعى أن يحتوى الملف الحلقي على عدد أكبر بكثير من لفات السلك عما هو مبين بالشكل . والمجال المغناطيسى محصور بالكامل تقريبا داخل الملف ويحيط بالملف الحلقي كما هو مبين . لحساب B فى هذه الحالة سنعتبر الدائرة السوداء على أنها هى العروة المقفلة . ومن تماثل الشكل نرى أن B ستكون ثابتة فى جميع نقط الدائرة كما أنها تكون مماسية للدائرة . عند استبدال مجموعة من المتجهات بالدائرة وتذكر أن B ثابتة فإن قانون أمبير يؤدى الى :

$$(IB_{\parallel})_1 + (IB_{\parallel})_2 + \dots + (IB_{\parallel})_n = (\mu_0) \text{ (التيار المحاط)}$$

ونحيث أن B ثابتة ،

$$B(l_1 + l_2 + \dots + l_n) = (\mu_0) \text{ (التيار المحاط)}$$

أو

$$(B)(2\pi r) = (\mu_0) \text{ (التيار المحاط)}$$

كما نرى ، يساوى التيار المحاط المقدار NI ، حيث N هى العدد الكلى لللفات السلك الموجود على الملف الحلقي . ومن ثم ،

$$2\pi r B = \mu_0 NI$$

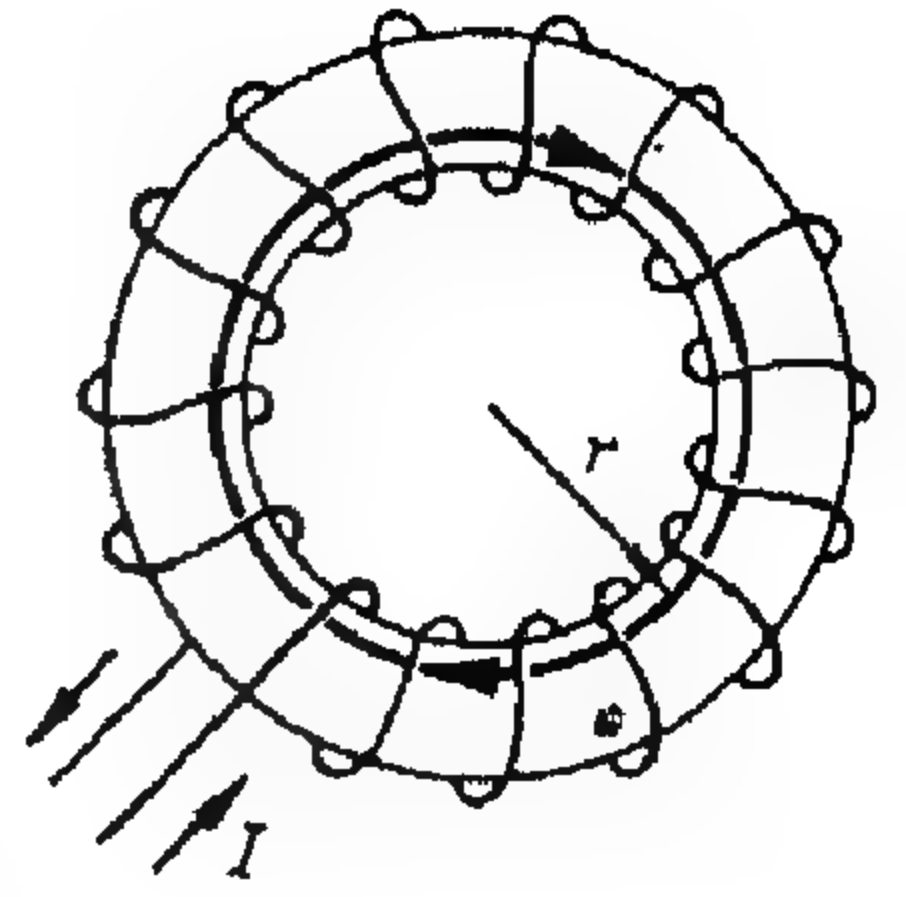
أو

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \quad \text{ملف حلقي} \quad \text{في ملف حلقي}$$

لاحظ أن B فى حالة الملف الحلقي ليست منتظمة بداخل الملف وذلك لأنها تتغير بتغير قيمة r . على أنه إذا كان قطر كل عروة يعتبر صغيرا إذا قورن بقطر الحلقة فإن r لن تتغير كثيرا من مكان لآخر داخل الملف الحلقي ويمكن على هذا اعتبار B ثابتة تقريبا .

مثال توضيحي ١٩ - ٤ : يحتوى ملف لولبي طويل على 50 لفة من السلك لكل سنتيمتر من طوله، وكان التيار المار فى السلك 0.50 A. فإذا كان قطر الملف اللولبي 2.0 cm فاوجد قيمة B فى الملف وكذا التدفق خلال الملف اللولبي .

طريقة الحل : لايجاد B نستخدم المعادلة (١٩ - ٧)



شكل ١٩ - ٢٤

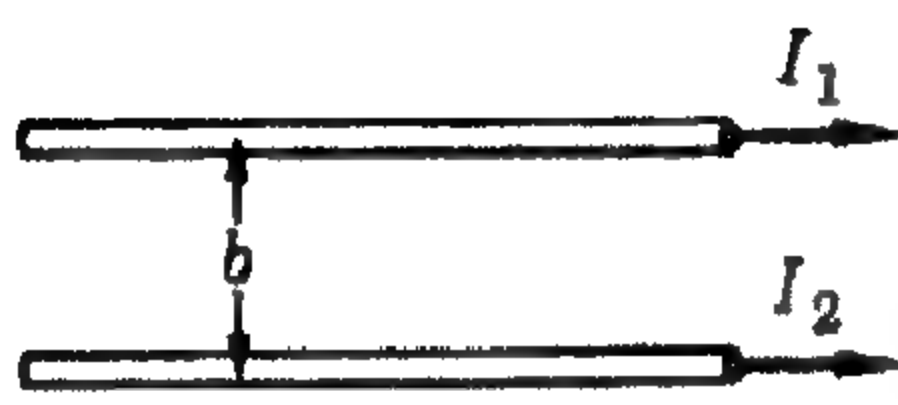
يلف المجال المغناطيسى داخل الملف الحلقي كما هو مبين ويتجه مع حركة عقارب الساعة داخل الملف الحلقي

$$B = \mu_0 n I = (4\pi \times 10^{-7})(50 \times 100)(0.50) \\ = 31.4 \times 10^{-4} \text{ T} = 31.4 \text{ G}$$

حيث أن عليك أن تكتب الوحدات المستخدمة في المعادلة . التدفق ϕ هو عدد الخطوط التي تمر خلال الملف اللولبي . هناك عدد B خط لوحدة المساحات تمر في الملف ولهذا فإن $\phi = BA$ ، حيث A هي مساحة المقطع للملف اللولبي . ومن ثم ،

$$\phi = (31.4 \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2)(\pi \times 10^{-4} \text{ m}^2) \approx 10^{-6} \text{ Wb}$$

حيث استخدمت العلاقة $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$



مثال توضيحي ١٩ - ٥ اعتبر السلكين الطويلين المستقيمين المتوازيين في الشكل (١٩ - ٢٥) اوجد القوة المؤثرة على وحدة الأطوال للسلك الأسفل والناجمة من التيار المار في السلك الأعلى .

طريقة الحل : يسبب التيار I_1 مجالا مغناطيسيا يتجه الى داخل الصفحة عند موقع I_2 ومقدار هذا المجال ،

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi b}$$

ولكن حيث أن القوة المؤثرة على سلك هي BIL ، وحيث أن $I = I_2$ في هذه الحالة ، فإن لدينا ،

$$F = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi b} I_2 L$$

ومنها

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b}$$

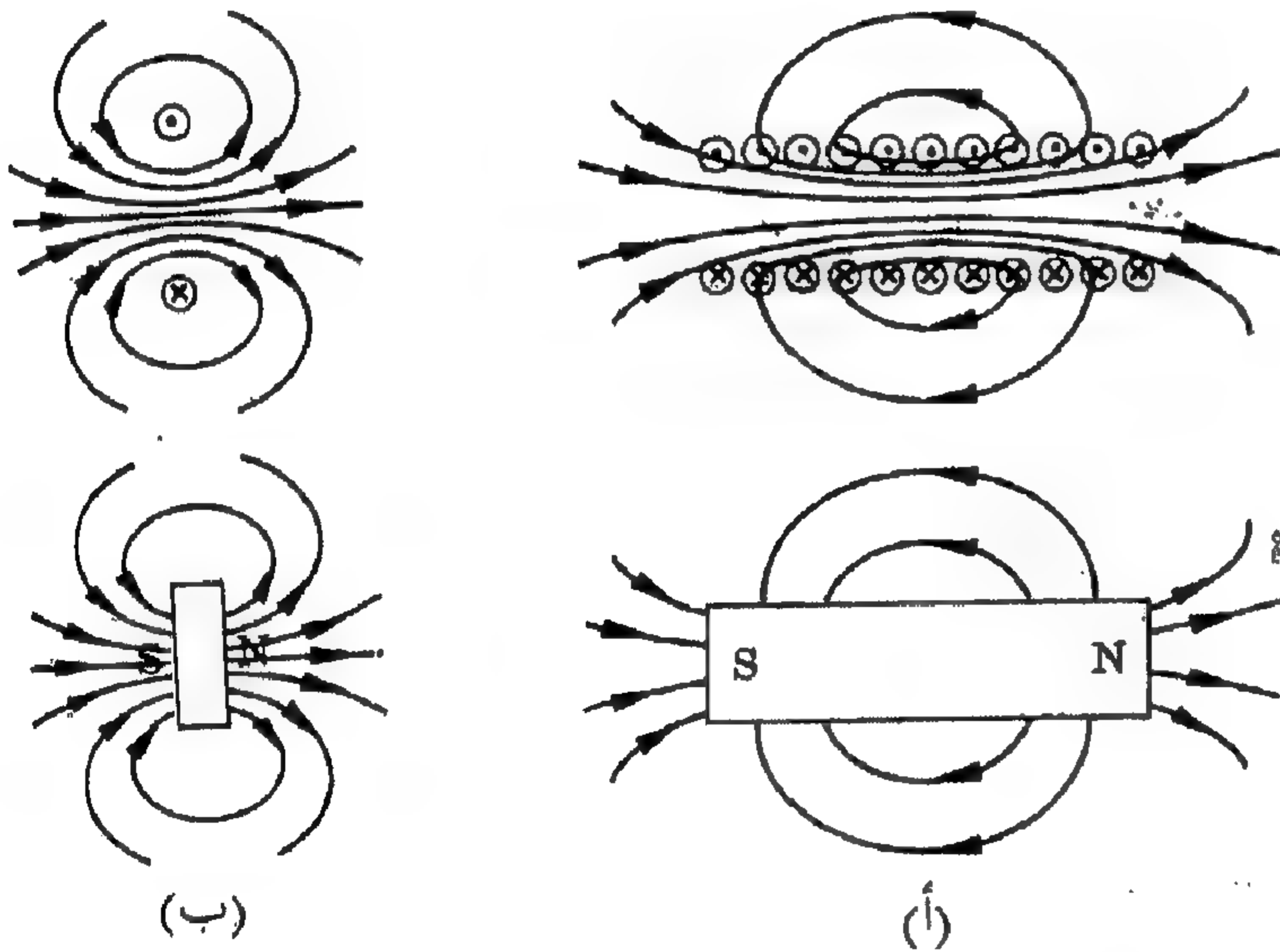
هل يمكنك اثبات أن اتجاه القوة يكون بحيث تدفع السلك الأسفل نحو السلك الأعلى ؟ لاحظ أنه عندما يحمل السلكان نفس التيار $I_1 = I_2 = I$ فإن هذا التيار يصبح مساويا $(2\pi b F / L \mu_0)^{1/2}$ وهذا يتيح طريقة لقياس التيارات بدلالة قياسات القوة والطول

١٩ - ١٣ نظرية أمبير للمغناطيسات

لايملك الانسان الا أن يلحظ التشابه بين المجال المغناطيسي لقضيب وذلك الذي للملف لولبي كما هو مبين في الشكل (١٩ - ٢٦) ، وقد لاحظ أمبير هذا أيضا .

وفي الحقيقة فقد لاحظ أنه حتى المجال الناشئ عن عروة واحدة كان يشبه تماما المجال الذي يتوقعه الانسان من مغناطيس قصير كما هو مبين في الشكل (١٩ - ٢٦ ب) . وقد وضع نظرية على أن كل التأثيرات المغناطيسية ، حتى في القضبان المغناطيسية ، هي نتيجة للتيارات السارية . ونعتقد أن هذه الافكار صحيحة من أساسها على الرغم من أننا لازلنا لم نفهم تماما لماذا تتصرف بعض الجسيمات الأساسية كالالكترون مثلا كما لو كانت مغناطيسات صغيرة .

لو أننا قبلنا نظرية أمبير فإننا نرى على الفور أنه من المستحيل تماما الحصول على قطب شمالي قائم بذاته ، فـالقطب الشمالي ليس إلا جانبا واحدا من عروة تيار (أو مجموعة من عرى التيار) وسيظل الجانب الآخر موجودا دائما كقطب جنوبي (انظر الشكل ١٩ - ٢٦) ولهذا السبب يتحدث الفيزيائيون اليوم عن خرافة القطب ، ويعنى هذا إنه لا يوجد جسيم يمكن اعتباره قطبا مغناطيسيا . وعلى العكس من الشحنات الموجبة والسالبة الطليقة فان القطب الشمالي والجنوبي لا يمكن فصلها عن بعضهما البعض أبدا بشكل تام* .



شكل ١٩ - ٢٦
المجال المغناطيسي حول ملف
لولبي شبيه جدا بمجال
قضيب مغناطيسي له نفس
الحجم تقريبا

في الواقع لم يكن لدى أمبير بالطبع أية فكرة عن تركيب الذرات والجزيئات حتى مع اعتقاده بأن المادة مكونة من ذرات. ولذا لم يستطع ان يدرك كيف يمكن أن تتواجد عرى التيار في قطعة من الحديد الممغنط . ونعلم اليوم أن كل ذرة تتصرف كمغناطيس صغير بل ان بعض الذرات كالحديد ، الكوبالت والنيكل (وكذا الجاد ولينيوم

المواد ذات المغناطيسية الحديدية

* هناك مجموعة حديثة من التجارب التي ابتكرت لتبين أن القطب المنفرد يمكن أن يوجد على « جسيم وحيد القطب » . ولـسوء حظ أولئك الذين يحبون الاثارة فان التفسير الذي عولجت به تلك التجارب كان خاطئا ولازال البحث عن الجسيم وحيد القطب مستمرا .

والديسبروزيوم) تتعاون مع بعضها البعض بحيث تتصرف تماما مثل مغناطيسات صغيرة قوية . وهذه الذرات تسمى ذرات ذات مغناطيسية حديدية . وتتصرف الذرات الأخرى مثل مغناطيسات أضعف

من المناسب دائما أن نفكر في الطبيعة المغناطيسية للذرات على أنها الى حد ما نتيجة لسريان الالكترون داخل الذرات بحيث تبدو كعمرى للتيار . فضلا عن ذلك فإن الالكترون نفسه يتصرف مثل قضيب مغناطيسي صغير . يمكن للإنسان أن يفكر في الالكترون على أنه شحنة تقوم بحركة تدويم حول محوره مكونا بهذا عروة تيار ويسمى هذا التأثير تدويم الالكترون . ويجب أن نشير الى أن معظم الفيزيائيين يتجهمون لهذه الصورة التفصيلية عن الذرة لأن هناك سببا للاعتقاد بأن هذه الصورة لا يمكن اثباتها عمليا ، فضلا عن ذلك فإن هذه الطريقة في تصوير التدويم ليست فرضية تماما من بعض النواحي ولازلنا غير قادرين على التوفيق بينها وبين النتائج الكمية للتجارب .

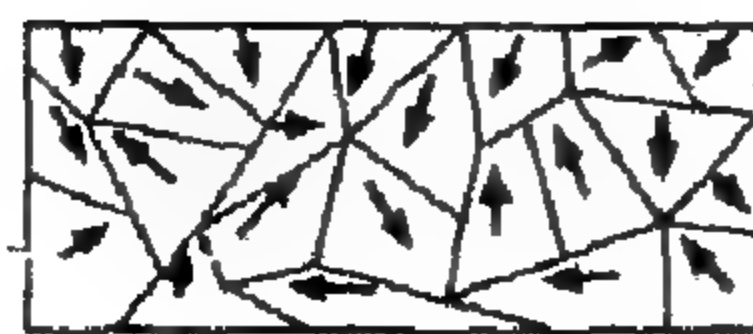
نعلم انه لو وضعنا مجموعة من المغناطيسات الدقيقة بالقرب من بعضها البعض فإنها تحاول ترتيب أنفسها بحيث يكون القطب الجنوبي لاحدها أقرب ما يكون للقطب الشمالي للآخر وهذا ناتج عن أن الاقطاب المختلفة تتجاذب وأن المتشابهة تتنافر . ويتم الوصول الى الحد الأدنى من طاقة الوضع للنظام عندما تتراص المغناطيسات بشكل ما كما في شكل (١٩ - ٢٧) . لاحظ ان المغناطيسات المتراصة بهذه الطريقة تكافئ مغناطيسا كبيرا .

على ان المغناطيسات اذا هيجت بشدة عن طريق هز الورق أو اللوح الذى تستقر فوقه المغناطيسات فإنها تنطلق من اسار بعضها البعض وينتهى بها الأمر كما هو مبين في الشكل (١٩ - ٢٧ ب) . لاحظ ان المغناطيسات المنفردة تميل الى الغاء بعضها البعض ولا تعود تؤثر كقضيب مغناطيسي قوى .

هناك موقف مشابه لهذا يحدث للذرات داخل الجسم الصلب ، فالاهتزازات الحرارية تميل الى تهيج النظام وتمنع الذرات من ترتيب أنفسها كما في الشكل (١٩ - ٢٧ أ) . ولايستطيع الاحتفاظ بالتشكيل المبين في الجزء (أ) إلا مغناطيسات ذرية معينة كالحديد والمواد ذات المغناطيسية الحديدية الأخرى وذلك عند درجات الحرارة العادية . وحتى هذه الذرات ، اذا سخنت بدرجة كافية فإنها تكتسب مايكفى من الطاقة الحرارية لكي تنطلق وتفقد ترتيبها كما في الجزء (ب) . وتعتبر درجة الحرارة التى يحدث

شكل ١٩ - ٢٧

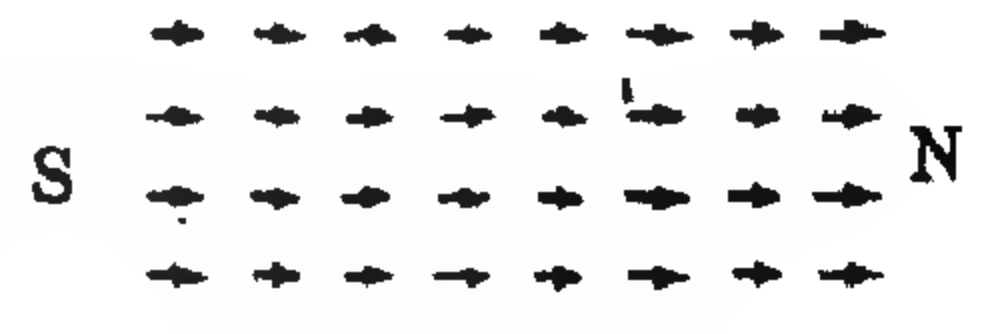
(أ) قطعة ممغنطة من الحديد ، (ب) الحديد غير الممغنط ، عديم الترتيب مبين تخطيطيا ، (ج) صورة أكثر واقعية للمناطق



(ج)



(ب)



(أ)

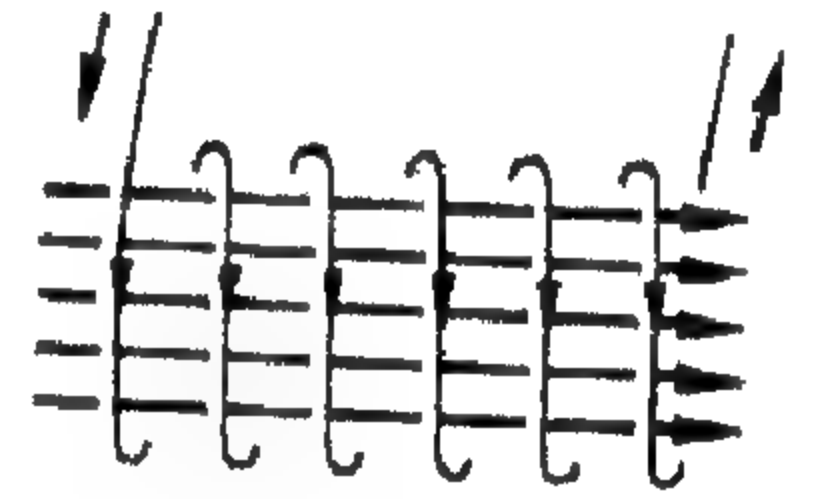
عندها هذا الأمر محددة تماما لأى طراز من الذرات وتسمى درجة حرارة كورى . على اننا يجب أن نسجل أن التشابه هنا ليس كاملا . فهناك بالإضافة الى قوى المغناطيسية بين الذرات ذات المغناطيسية الحديدية ، قوى أخرى ذات طبيعة أكثر تعقيدا . وهذه القوى يمكن فهمها فى اطار ميكانيكا الكم فقط ولذا فلن نستطيع أن نناقشها أكثر من ذلك فى هذا المقام . وهى تلعب الدور الرئيسى فى تراص المغناطيسات الذرية .

المغناطيسية الحديدية والمناطق

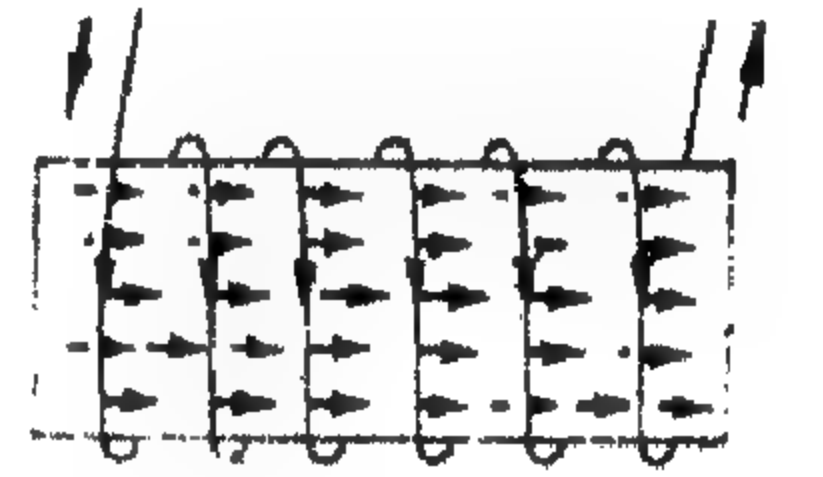
معظم المواد تكون مغناطيساتها الذرية - إن وجدت - متجهة عشوائيا كما فى الشكل ١٩ - ٢٧ ب . على أن المواد ذات المغناطيسية الحديدية تتكون من قطع صغيرة تكون بداخلها الذرات متراسة بكاملها كما فى الشكل ١٩ - ٢٧ ب ، وكل من هذه القطع المرتبة تسمى منطقة . إذا تناولنا اية قطعة عادية من انبوبة حديدية ، فان كل منطقة قد تحتوى على مايقرب من 10^{16} ذرة . وهذه المنطقة لاتشغل سوى كسر صغير من المليمتر بالنسبة لابعادها الخطية . على أن المناطق فى قطعة غير ممغنطة من الحديد تكون فيما بينها متجها عشوائيا ويصبح الموقف أقرب مايكون الى الشكل (١٩ - ٢٧ ب) حيث تمثل الأسهم مناطق مختلفة بدلا من ذرات . اما الشكل (ج) فيعطى صورة أكثر واقعية للمناطق . فإذا أردنا أن نمغنط قضيبا من الحديد فإن المناطق داخله يجب أن تصطف داخل المادة ويمكن الوصول الى هذا بالطريقة التالية .



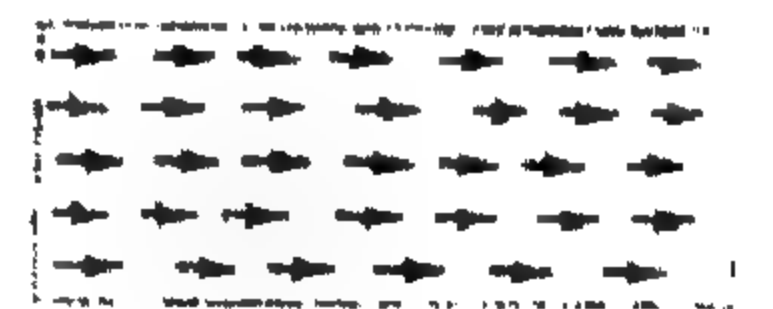
(أ)



(ب)



(ج)



(د)

افتراض اننا بدأنا بقضيب غير ممغنط من الحديد كما فى الشكل (١٩ - ٢٨ أ) . هناك ملف لولبى يحمل تيارا كما هو موضح فى الجزء (ب) من الشكل ولهذا الملف مجال مغناطيسى ضعيف بداخله كما أوضحنا فى المثال التوضيحي ١٩ - ٤ . لو أننا الآن أدخلنا الحديد فى الملف اللولبى فإن المجال المغناطيسى B للملف اللولبى سوف يؤثر بقوة إلى اليمين على الأقطاب الشمالية للمناطق أما الأقطاب الجنوبية فتجبر على الاتجاه الى اليسار . إذا كانت قوى الاحتكاك بين المناطق ليست كبيرة بدرجة كافية فان المناطق ستوجه تحت تأثير المجال كما هو مبين فى الجزء (ج) من الشكل ١٩ - ٢٨ .

وتصبح قطعة الحديد قضيبا مغناطيسيا له قطب شمالي وآخر جنوبي . ومن السهل توجيه المناطق فى حالة الحديد « الرخو » أما فى حالة الحديد الصلب فيجب أن يكون المجال كبيرا بدرجة كافية أو تهيج المناطق بالتسخين أو الطرق الميكانيكية حتى يمكنها الدوران واتخاذ اتجاه المجال . (ترجع التسمية بالرخو او الصلب فقط الى الخواص

شكل ١٩ - ٢٨

يمكن مغنطة قطعة من الحديد غير الممغنط باستعمال المجال داخل ملف لولبى ليقوم بترتيب المناطق

* فى الواقع تدور المناطق معا ككل بشكل نادر نسبيا ويكون أكثر الترتيب حدوثا عن طريق نمو المناطق الموجهة توجيهها صحيحا على حساب المناطق الأخرى ذات التوجيه الخطأ . وأثناء هذه العملية لوحظ أن جدران المناطق تتحرك . الطاقة اللازمة لهذه العملية وكذا التأثيرات الناتجة هى بالضرورة نفسها بالنسبة للعملية الأولى (نمو المناطق) .

المغناطيسية وليس الى الصلادة الفيزيائية) . من الممكن ترتيب المناطق بطريقة كاملة تقريبا وتكوين قضيب مغناطيسي كبير كما في الجزء (ج) .

حالما تترتب المناطق ، فإن كثافة الفيض الكلية B تتركب من جزئين . لازل مجال الملف اللولبي الضعيف موجودا ، على أن المجال الذي ينشئه القضيب المغناطيسي يكون عادة أكبر مئات المرات من المجال الخاص بالملف اللولبي وحده . تسمى المجموعة المكونة من ملف لولبي وبداخله قطعة من الحديد الرخو مغناطيسا كهربائيا .

والآن ، لو أن التيار المار في الملف اللولبي أزيل لعادت المناطق في قضيب الحديد الرخو الى حالتها الأصلية تقريبا كما يوضح الشكل (أ) ، فالحركة الحرارية تجعل المناطق تتبعثر . وهذا الموقف مستحب في حالة المغناطيسيات الكهربائية لأنه يسمح بتشغيله أو وقفه حسب الرغبة . أما قطعة الحديد الصلب - من ناحية أخرى - فإنها تحتفظ بمعظم الترتيب ولذا تصبح قضيبا مغناطيسيا دائما كما هو مبين في الجزء (د) من الشكل ١٩ - ٢٨ .

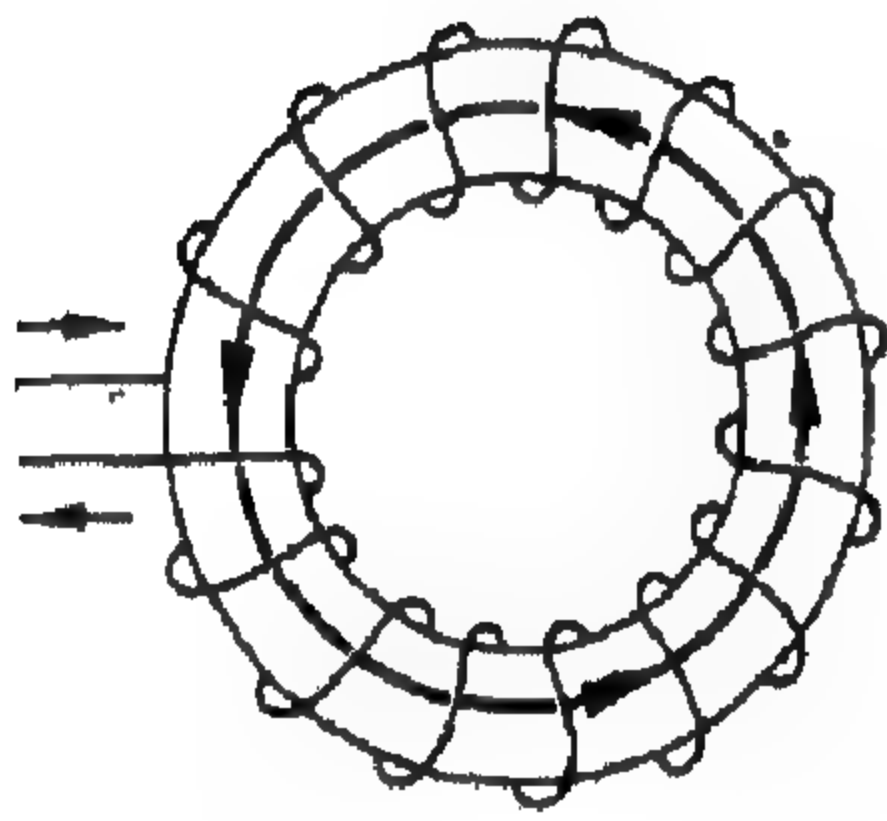
١٩ - ١٤ منحنى B مقابل H

اعتبر الآن الملف الحلقي المبين في شكل ١٩ - ٢٩ . لو كان هذا الملف قد لف حول قلب خشبي أو حول اية مادة أخرى غير مغناطيسية فإن المجال داخل الملف الحلقي سيكون ناتجا بالكلية تقريبا من التيار المار في السلك . لقد وجدنا في المعادلة (١٩ - ٨) أن B في الملف الحلقي كانت ،

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2\pi r} \quad \text{ملف حلقي}$$

حيث N هي العدد الكلي للعرى بالملف الحلقي .

لو كان علينا أن نلف الملف الحلقي حول قلب حديدي ، فإن المجال الناتج عن التيار سيميل الى مغتطة الحديد ، وتقوم المناطق المغناطيسية التي رتب بزيادة B زيادة كبيرة داخل الملف الحلقي كما رأينا في القسم السابق . وفي هذه الحالة فإن المعادلة (١٩ - ٨) لن تبقى صحيحة بالنسبة للمجال داخل المادة ذات المغناطيسية الحديدية والمستخدم في الملف الحلقي ، وفي الواقع يجب ضرب المعادلة (١٩ - ٨) في معامل ضخم لكي نحصل على الكثافة الصحيحة للفيض . من المعتاد أن نكتب ،



شكل ١٩ - ٢٩

تعتمد قيمة B داخل الملف الحلقي على المادة التي يلف حولها الملف

$$B = \mu \frac{NI}{2\pi r} \quad \text{ملف حلقي} \quad (9 - 19)$$

حيث μ هي الانفاذية المغناطيسية للمادة التي لف حولها الملف الحلقي .

في حالة ملف حلقي مجوف فان μ تصبح هي μ_0 ، الانفاذية المطلقة في الفراغ . وهذه طريقة أخرى للنص على أن المواد غير المغناطيسية لا تغير التدفق كثيرا ، لأن ميل المغناطيسات الذرية الى الترتيب ليس قويا بدرجة كافية لكي يسبب تأثيرات محسوسة . ولكن μ للمواد ذات المغناطيسية الحديدية تكون عادة أكبر مئات المرات من μ_0 ذلك لأنها تزيد B بدرجة هائلة .

من المناسب دائما الفصل بين المجال الممغنط الناشئ عن التيار المار في السلك والمجالات المركبة من التيار ومادة الملف اللولبي ، وعليه فاننا نعرف شدة المجال الممغنط أو شدة المجال المغناطيسي H على أنها (بداخل الملف الحلقي)

$$H = \frac{B}{\mu}$$

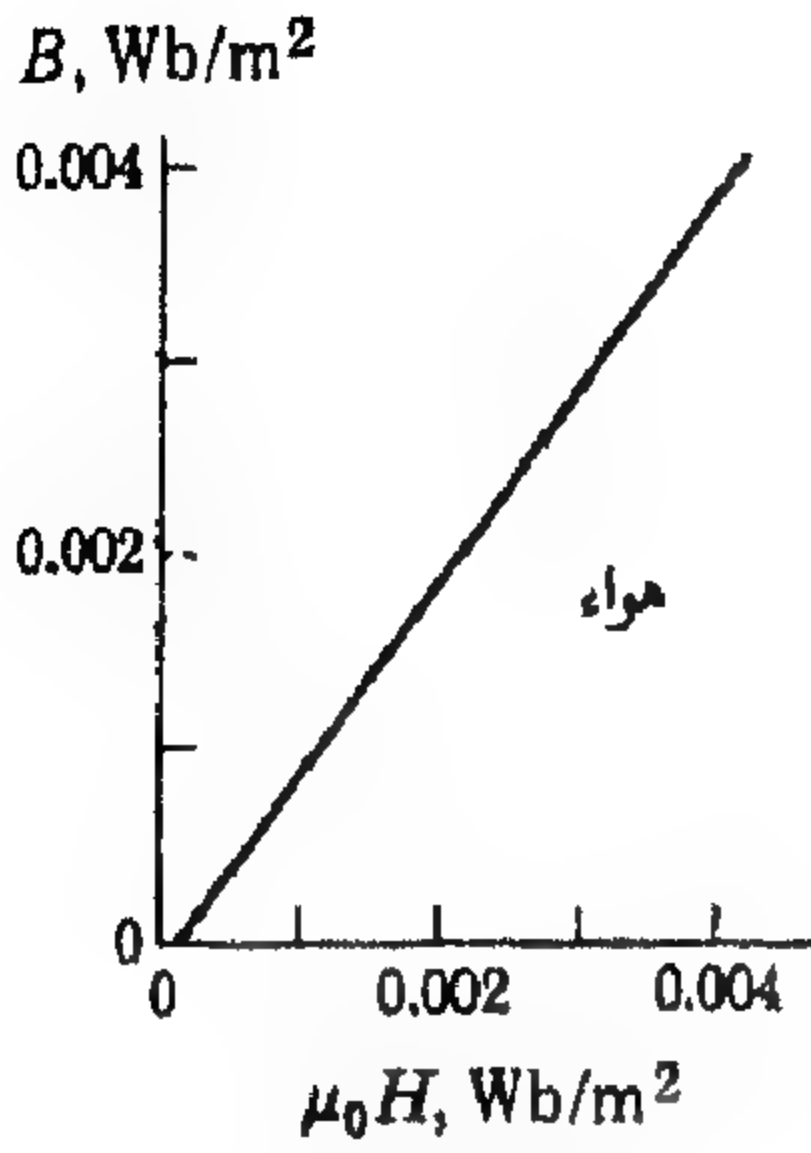
$$B = \mu H \quad (9 - 10)$$

لاحظ ان المعادلة 9 - 19 تؤول الى :

$$H = \frac{NI}{2\pi r} \quad \text{للملف الحلقي} \quad (9 - 11)$$

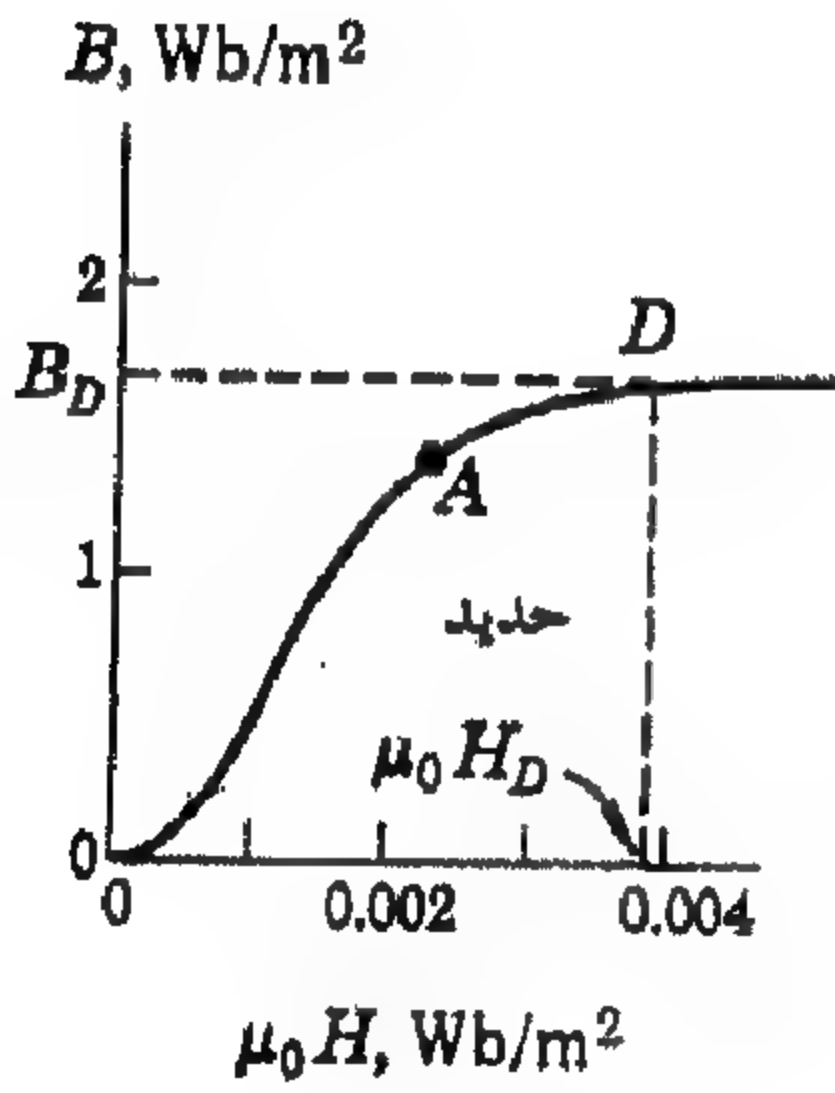
ولهذا فان ، شدة المجال المغناطيسي H لا تعتمد على المادة التي يلف حولها الملف الحلقي . والتعريف المعطى هنا للكمية H ليس كاملا في حالات أخرى غير الملف الحلقي أو في الفراغ فلو أن الأقطاب غير المتوازنة والتي تظهر على السطح أو داخل قضبان حديدية كانت موجودة كما في حالة قضيب مغناطيسي فان H تعرف على أنها تجميع لتأثيرات التيار في السلك وكذا تأثيرات الأقطاب . وقد تظهر بعض المضاعفات أيضا في حالة مناطق في حالة عدم اتزان حيث أن قيمة B في ملف حلقي مجوف هي $\mu_0 H$ ، لذا من المعتاد أن نعبر عن التأثير المغناطيسي لمادة ما وذلك بمقارنة $\mu_0 H$ مع قيمة B الموجودة فعلا داخل الملف الحلقي . والكمية $\mu_0 H$ يمكن حسابها بمعرفة أبعاد الملف الحلقي والتيار المار فيه بواسطة المعادلة (9 - 11) . وسنرى فيما بعد أن B في الملف الحلقي يمكن قياسها بسهولة تامة ، ومن ثم يمكن رسم المنحنى المسمى B مقابل H للمادة . (قد يكون

من الأحسن رسم منحنى B مقابل $\mu_0 H$ في نظام الوحدات المتبع لدينا على الرغم من أن الفرق الوحيد هو في الكمية μ_0 التي تضرب في كل قيمة من قيم H .



شكل ١٩ - ٣٠

منحنى B مقابل H وهذا يخص ملفا حلقيا ذا قلب هوائي . قارنه بالشكل ١٩ - ٣١



شكل ١٩ × ٣١

منحنى B مقابل H ملف حلقى ذي قلب حديدي . لاحظ الفرق في مقياس الرسم الأفقي لهذا المنحنى وذلك الذي في شكل ١٩ - ٣٠

لنرسم أولا منحنى B مقابل $\mu_0 H$ للهواء . بما أن الهواء ليس له خواص مغناطيسية محسوسة لذا فقيمة μ للهواء هي بالضرورة μ_0 وتفيدنا المعادلة (١٩ - ١٠) أن $\mu_0 H = B$ للهواء ، ويكون منحنى B مقابل $\mu_0 H$ كما هو مبين في الشكل (١٩ - ٣٠) وكما رأينا في المثال التوضيحي ١٩ - ٤ تكون قيمة B داخل ملف حلقى عادى في حدود 0.003 Wb/m^2 ، بشرط ألا يكون ملفوفا حول مادة ذات مغناطيسية حديدية . وبما أن $B = \mu_0 H$ في هذه الحالة ، لذا فإن $\mu_0 H$ ، B سيزدادان معا خطوة بخطوة ، فإذا كان أحدهما صفرا فان الآخر يكون صفرا كذلك ويصل الاثنان الى 0.003 Wb/m^2 معا .

افترض الآن أن الملف الحلقى ملفوف حول قلب حديدي . حيث أن $\mu_0 H$ لا تعتمد على مادة القلب وأنها ناتجة فقط عن التيار نفسه لذا تتغير الكمية $\mu_0 H$ من الصفر حتى تصل الى 0.003 Wb/m^2 في هذه الحالة أيضا . ولكننا نعلم أن تراض المناطق في القلب الحديدي يزيد كثيرا من قيمة B عند مرور تيار ضعيل في السلك ، فان المجال المغنط الناشئ عن التيار لن يقوم بترتيب كثير من المناطق ، ولكن بزيادة $\mu_0 H$ تستمر المناطق في التراض مما ينتج عنه زيادة هائلة في قيمة B . ويصور الشكل ١٩ - ٣١ هذا الموقف .

لاحظ أن مقياس رسم B على المحور الرأسى اكبر 500 مرة في الشكل ١٩ - ٣١ عنه في الشكل ١٩ - ٣٠ ، ولو أننا حاولنا أن نرسم الخط الموجود في شكل ١٩ - ٣٠ بمقياس الرسم الموجود في ١٩ - ٣١ فان الخط سيبدو أفقيا ومارا بالصفر . ويساهم القلب الحديدي بمجال أكبر بكثير جدا عن ذلك الذى يساهم به التيار المار في السلك .

من الواضح أن المنحنى B مقابل $\mu_0 H$ يستوى فوق النقطة D ويحدث هذا نتيجة لان كل المناطق تقريبا تكون قد رتبت وتراضت عند هذه النقطة . اذا زادت قيمة $\mu_0 H$ بعد تلك النقطة فان عددا قليلا جدا من المناطق يضاف الى المناطق المتراسة وبذا تظل B ثابتة تقريبا ، ويقال في هذه الحالة أن الحديد قد تشبع ، أى أن جميع المناطق قد تراضت وأن B أصبحت أكبر ما يمكن .

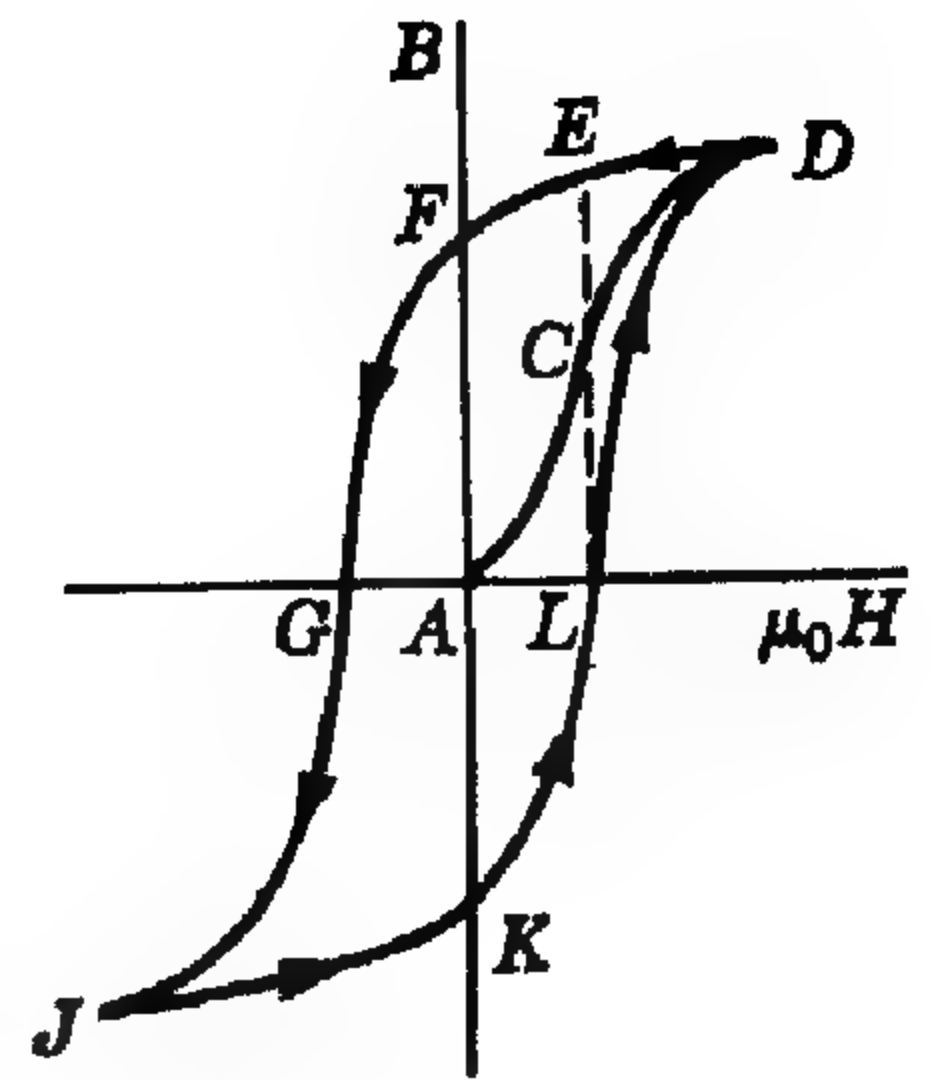
حيث أن الانفاذية المغناطيسية للحديد ، μ ، معرفة بالمعادلة

$$B = \mu H$$

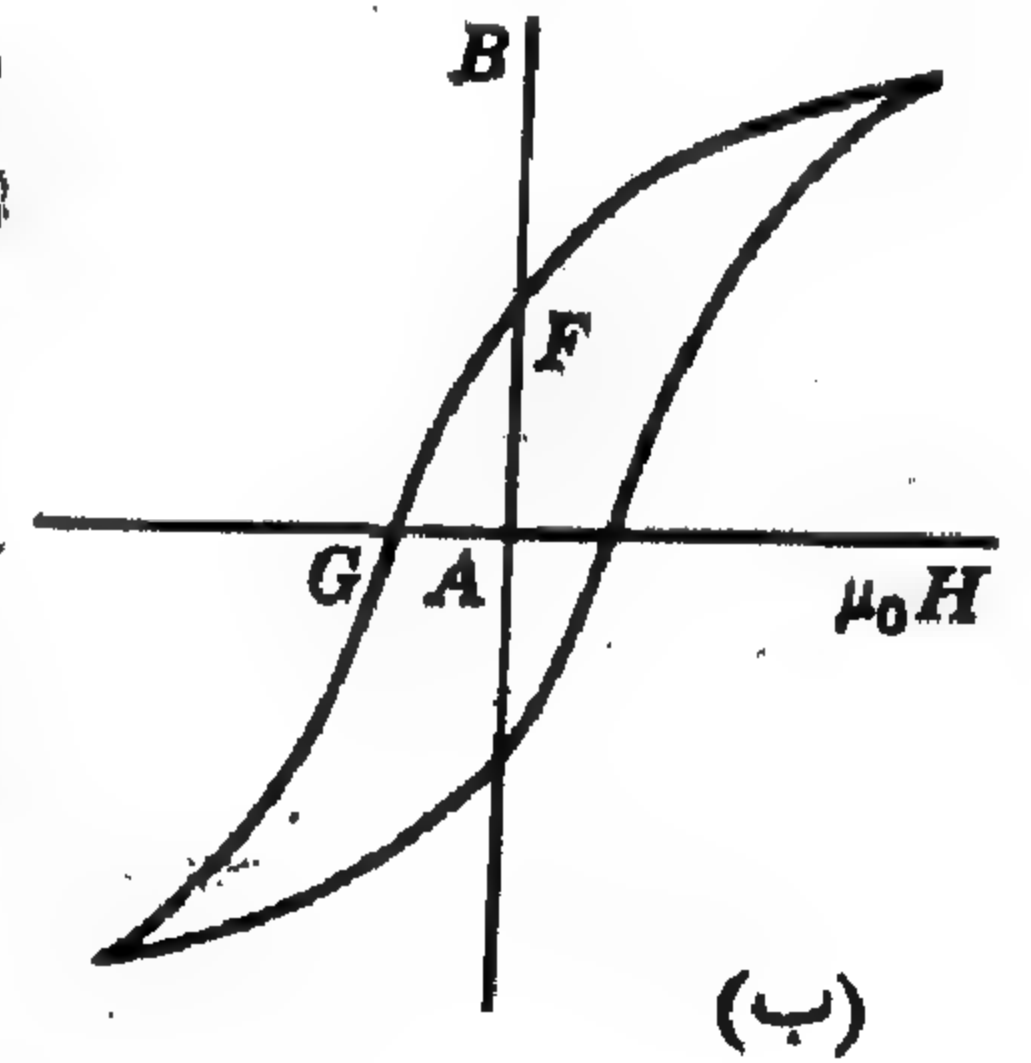
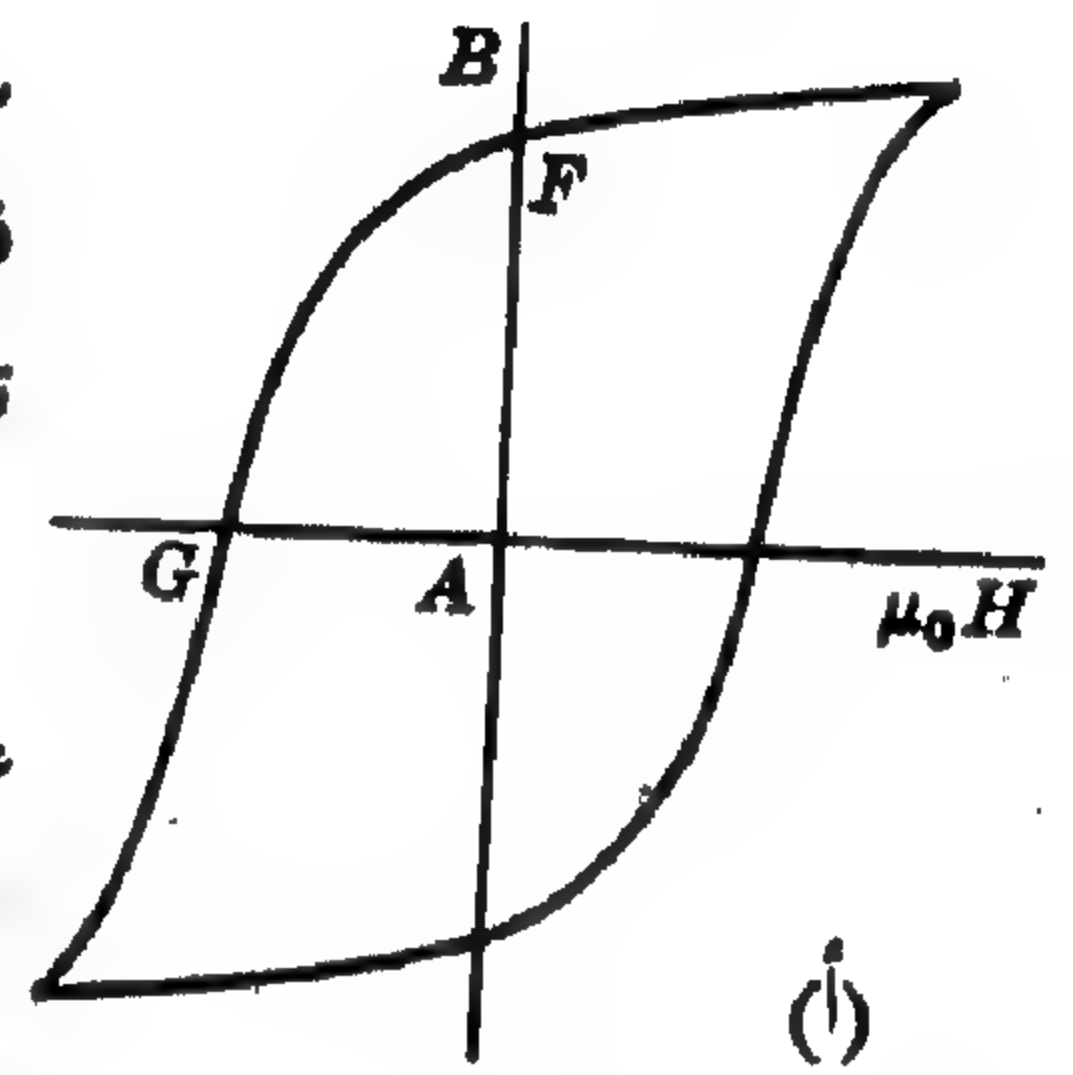
فان قيمتها يمكن أن تتعين من الشكل ١٩ - ٣١ . فعند النقطة D مثلا لدينا قيم معلومة لكل من B ، H وهى القيم H_D, B_D وعندئذ ،

$$\mu_D = \frac{B_D}{H_D}$$

وكنتيجة لحقيقة أن العلاقة التجريبية بين H, B ليست خطا مستقيما بالنسبة للحديد لذا فان μ لن تكون ثابتة وإنما ستتغير بشدة مع H .



شكل ١٩ - ٣٢
منحنى التخلفية لمادة ذات
مغناطيسية حديدية



شكل ١٩ - ٣٣
المادة التى لها أنشطة تخلفية
كالتى فى الجزء (أ) يصنع منها
مغناطيس دائم أفضل من
التى لها أنشطة كالتى فى
(ب) لماذا ؟

١٩ - ١٥ منحنى التخلفية

لنعتبر الآن تجربة أخرى باستخدام ملف حلقى ذى قلب حديدى . افترض أننا قمنا بزيادة المجال المغنط H حتى تشبع الحديد ، سنكون عندئذ عند النقطة D فى الشكل ١٩ - ٣٢ . لو أننا الآن خفضنا من التيار فى الملف الحلقى ، فإن $\mu_0 H$ سوف تتضاءل . ولكن حيث أن هناك احتكاكا - قل أو كثر - بين المناطق لذا فإن هذه المناطق ستميل الى البقاء مرتبة ، ومن ثم لن تقل قيمة B بشكل ضخم وقد تعود الى النقطة E على المنحنى بدلا من أن تعود الى النقطة C .

لو أن التيار أطفئ فى الملف الحلقى فان بضع مناطق ستبقى متراصة وستكون عند النقطة F على المنحنى ، أما اذا عكس التيار المار فى الملف الحلقى ، فإن المجال $\mu_0 H$ يصبح سالبا ويكون قادرا فعلا على ادراة عدد كاف من المناطق حتى تصبح B صفرا كما هو مبين عند النقطة G . وكلما أصبح المجال المغنط $\mu_0 H$ أكثر سالبة ، فإن الحديد يصبح فى النهاية مشبعا فى الاتجاه العكسى وهذا ماتشاهده عند النقطة J .

عند خفض التيار المار فى الملف الحلقى مرة أخرى الى الصفر فاننا نتبع النقط L, K, J عائدین الى النقطة D على المنحنى ونكون بذلك قد رانتهينا الى الحديد وهو ممغنط كما كان فى البداية . على أن تغيير حالة الحديد خلال الدورة D, L, K, J, B, F, D استلزم فقد كثير من الطاقة على هيئة شغل احتكاكى بذل فى دوران المناطق وكذا فى تحريك جدرانها . يمكن للإنسان أن يثبت أن الاحتكاك والشغل المبذول يتناسبان مع مساحة هذه العروة المسماة أنشطة التخلفية (hysteresis loop) ويظهر هذا الشغل على هيئة حرارة داخل الحديد .

يبدو أن أفضل المواد لصنع مغناطيس دائم هى تلك التى لها أنشطة تخلفية كتلك التى فى الشكل (١٩ - ٣٣) أ . هذه المادة تعتبر ذات مزايا هامة لأن لها محتفظية (retentivity) وهو الطول AF ولأنها تحتاج الى قوة مغناطيسية قهرية (coercive force) لازالة مغنطتها ، ومن ثم فإن هذه المادة تكون مغناطيسا قويا (كثير

من التدفق خلالها) ويكون من الصعب إزالة مغنطتها (وهى بهذا تكون مغناطيسا دائما) .

من ناحية أخرى يحتاج الحديد المستخدم فى المغناطيس الكهربائى أن تكون له انشودة تخلفيه كالتى فى الشكل (١٩ - ٣٣ ب) (لماذا ؟) . سنرى فى الفصل القادم أن المحرك والمولد يجب أن تصنع قلوبهما من حديد من هذا النوع . (هل هذا الحديد رخو أم صلد ؟) .

ملخص

الابرة المغناطيسية هى قضيب مغناطيسى دقيق . الطرف الذى يشير الى الشمال هو قطبها الشمالى . تتنافر الاقطاب المغناطيسية المتشابهة وتتجاذب الاقطاب المختلفة . لكل مغناطيس دائما قطبان أحدهما شمالى والآخر جنوبى . تؤثر المجالات المغناطيسية على الأقطاب المغناطيسية بقوة معينة . تقوم ابرة البوصلة بالأصطفاف مماسة لخطوط المجال المغناطيسى . تخرج هذه الخطوط من الأقطاب الشمالية وتدخل فى الأقطاب الجنوبية للمغناطيسات . يتعرض سلك مستقيم طوله L ويحمل تيارا I لقوة مقدارها $F = B_{\perp}IL$ اذا وضع فى مجال مغناطيسى شدته B والكمية B_{\perp} هنا هى مركبة B العمودية على السلك . وحدات كثافة الفيض B (أو الحث المغناطيسى) هى webers لكل square meter وهذه الوحدة هى نفسها tesla (T) يتعين مستوى ما يتقاطع خطوط B مع L وتكون القوة فى اتجاه متعامد مع هذا المستوى ويعطى بقاعدة اليد اليمنى المعدلة .

تعرض الشحنات المتحركة ايضا لقوة فى المجال المغناطيسى ، وتعطى هذه القوة بالمعادلة $F = qB_{\perp}v$ حيث B_{\perp} هى مركبة B العمودية على السرعة v . يكون اتجاه القوة هو نفس اتجاه القوة المؤثرة على التيار المكون من جسيمات متحركة . تتحرك الشحنة التى لها سرعة v عمودية على مجال مغناطيسى B بحيث يكون مسارها دائريا . يمكن إيجاد نصف قطر المسار الدائرى بمساواة القوة المغناطيسية مع قوة الجذب المركزية .

اتفق على رسم عدد \bar{B} من خطوط المجال المغناطيسى خلال وحدة مساحات عمودية على المجال ، ويكون التدفق ϕ خلال مساحة قدرها A هو عدد الخطوط التى تمر خلال هذه المساحة . يمكن حساب التدفق من المعادلة $\phi = B_{\perp}A$

يمكن استخدام قانون أمبير للدوائر فى حساب المجالات للمغناطيسية الناشئة عن تيارات . ويكون المجال خارج سلك مستقيم طويل هو $\mu_0 I / 2\pi r$ ، أما المجال فى ملف لولبى طويل فهو $\mu_0 nI$.

لا تغير معظم المواد من قيمة المجال المغناطيسى كثيرا حين توضع فيه ، ولكن المواد ذات المغناطيسية الحديدية فتزيد من المجالات المغناطيسية كثيرا حين توضع فيها . وهذه المواد أجواء تكون جيدة الترتيب بالنسبة للذرات تسمى مناطق وكل منطقة تعمل مثل مغناطيس . يمكن للمناطق أن تتراص وذلك بوضع المادة فى مجال مغناطيسى قوى .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

- ١ - أن تخطط المجال المغناطيسى بجوار (أ) المغناطيسات المختلفة ، (ب) سلك مستقيم ، (ج) عروة من السلك ، (د) ملف لولبى ، (هـ) ملف حلقي .
- ٢ - أن تستعمل بوصلة فى تحديد خطوط المجال المغناطيسى فى حيز معين .
- ٣ - أن توجد مقدار واتجاه القوة المؤثرة على سلك مستقيم يحمل تيارا فى مجال مغناطيسى محدد .
- ٤ - أن تستعمل المعادلة $F = B_{\perp}IL$ لإيجاد إحدى الكميات اذا علمت الكميات الأخرى .

- ٥ - أن تستعمل المعادلة $F = qB_{\perp}v$ لإيجاد إحدى الكميات إذا علمت الكميات الأخرى وأن تصف بطريقة كمية المسار الذي يتبعه جسم له شحنة q وسرعة v معروفتان ويتحرك عموديا على مجال مغناطيسي معين .
- ٦ - أن تعين التدفق خلال مساحة معينة عندما تكون B معلومة في تلك المنطقة
- ٧ - أن تحسب المجال المغناطيسي لسلك طويل مستقيم وملف لولبي إذا أعطيت البيانات الكافية .
- ٨ - أن تستطيع - إذا أعطيت قائمة بمواد شائعة - اختيار بعضها الذي يكون قادرا على إجراء تغيير كبير في المجال المغناطيسي الذي يوضع فيه .
- ٩ - أن تشرح معنى المناطق المغناطيسية وأن تصف بدالاتها ما يحدث لقضيب من مادة ذات مغناطيسية حديدية حين تمغنط أو تزال مغنطتها .
- ١٠ - أن ترسم منحنى المغنطة لمادة غير مغناطيسية وأخرى ذات مغناطيسية حديدية ، وأن تشرح الملامح الرئيسية لكل منحنى .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

تجاذب الأقطاب المختلفة وتنافر الأقطاب المتشابهة .

خط المجال المغناطيسي

قاعدة اليد اليمنى

$F = B_{\perp}IL$, gauss, Webers/square meter, Tesla

كثافة التدفق ، الحث المغناطيسي

القوة المغناطيسية لا تبذل أى شغل

منتقى السرعات

يوجد قطب جنوبي بالقرب من القطب الشمالي للأرض

التدفق ، $\phi = B_{\perp}A$

قانون أمبير للدوائر

$B = \mu_0 I / 2\pi r$; $B = \mu_0 nI$

نظرية أمبير للمغناطيسات ، توجد الأقطاب أزواجا

المواد ذات المغناطيسية الحديدية ، المناطق

منحنى المغنطة

منحنى التخلفية

أسئلة وتخمينات

- ١ - خطط المجال المغناطيسي لقضيبين مغناطيسيين متماثلين وموضوعين كما في الشكل (م ١٩ - أ) ، خطط المجال المغناطيسي للموقف المين في الجزء (ب) اذا كانت القطعة المعدنية المستديرة من الحديد . أعد باعتبارها من النحاس الأصفر .
- ٢ - يقوم المغناطيس بجذب مسمار غير ممغنط من الحديد ويقوم المسمار بجذب آخر . اشرح لماذا ؟



(a)



(b)

٣ - تستقر عروة دائرية على المنضدة وهي تحمل تيارا يدور في اتجاه عقرب الساعة كما سبق . يستقر قضيب مغناطيسي رأسيًا في مركز العروة بحيث يكون قطبه الشمالي على المنضدة ، بينما يكون قطبه الجنوبي فوق الشمالي تماما . صف القوة المؤثرة على العروة والتي يسببها المغناطيس .

٤ - تستقر عروتان دائريتان على منضدة وهما متحدتا المركز . تحمل العروة الكبرى تيارا قدره 10A في اتجاه ضد حركة عقرب الساعة بينما تحمل الصغرى تيارا قدره 5A في اتجاه عقرب الساعة . صف القوة المؤثرة على كل عروة .

٥ - يقوم طرفا جهد مرتفع بالتسبب في أن شعاعا من الجسيمات المشحونة يتطلق إلى اليمين خلال أنبوبة مفرغة جزئيا كما هو موضح في الشكل م (١٩ - ٢) . يظهر مسار الشعاع على ستار فلوري موضوع بطول الأنبوبة . ينحرف الشعاع كما هو مبين ، عندما يقترب مغناطيس على هيئة حذاء القرس من الأنبوبة . كيف يمكنك تحديد إشارة الشحنة على الجسيمات ؟

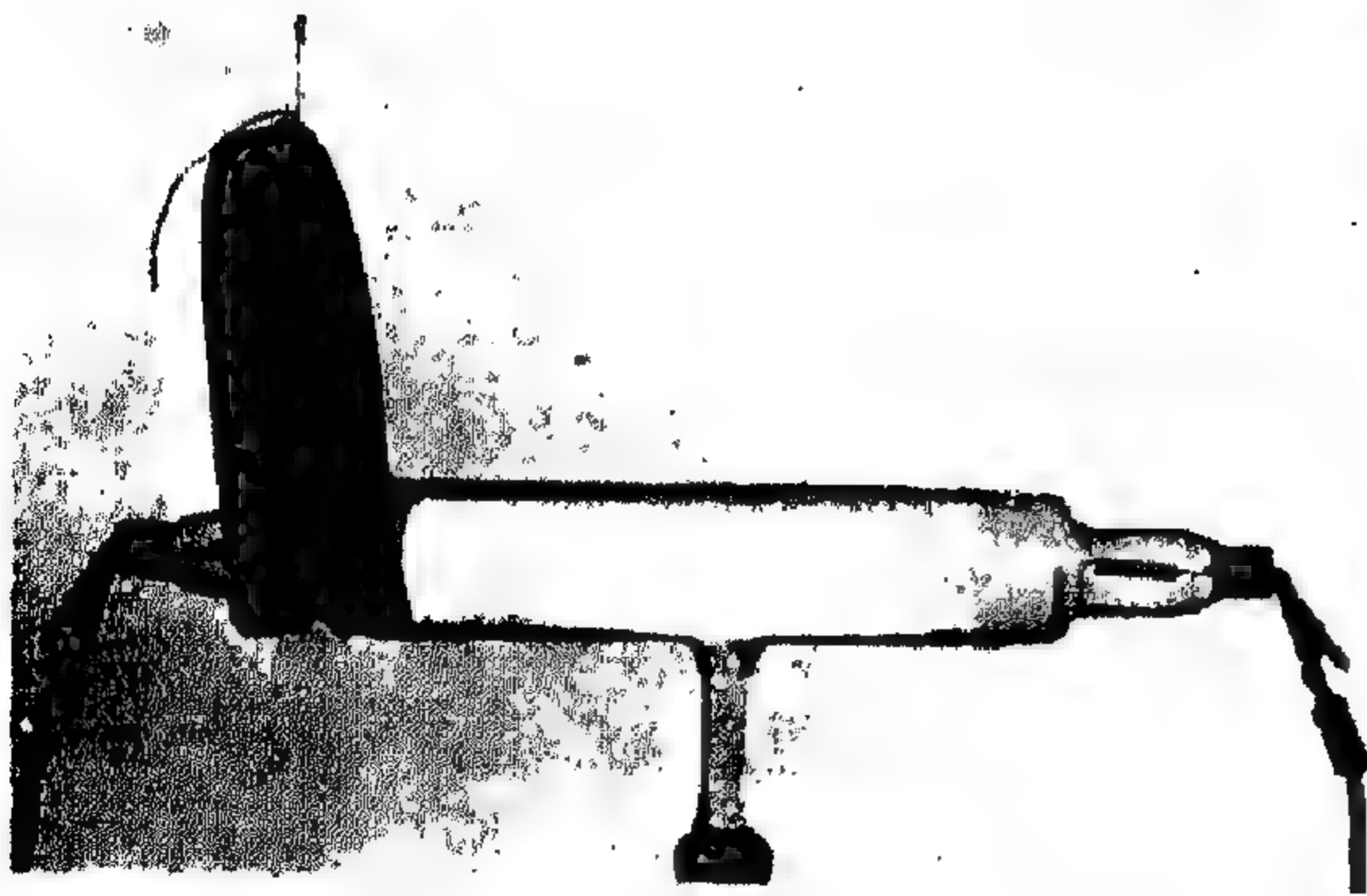
٦ - قذف الكترون داخل ملف لولبي طويل في اتجاه يصنع زاوية صغيرة من محور الملف . صف حركة الالكترون .

٧ - لماذا لا يمكن الحصول على قطب شمالي منفرد وذلك بكسر مغناطيس إلى قطعتين ؟

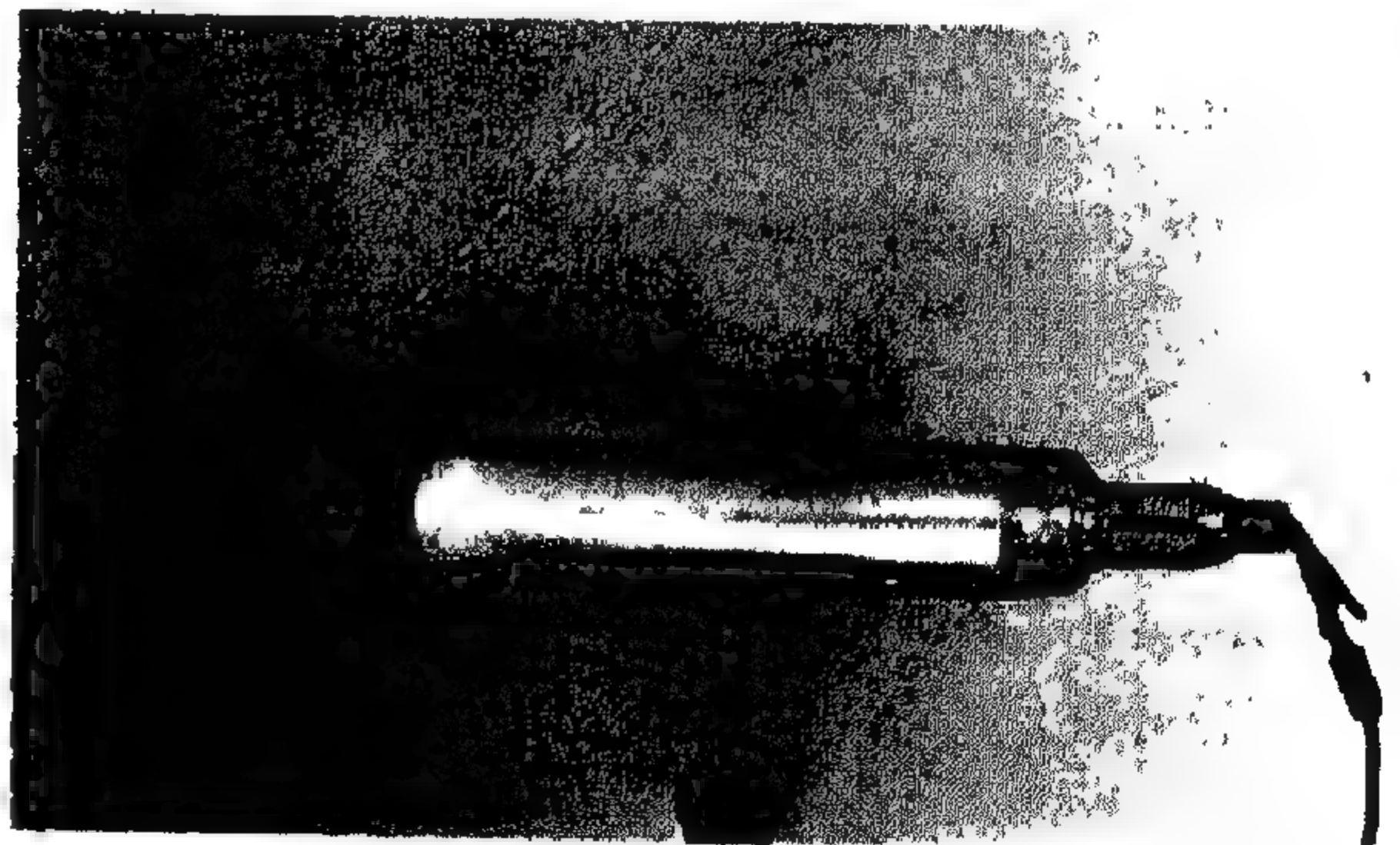
٨ - يتعرض سلك يحمل تيارا في المجال المغناطيسي للأرض لقوة تتجه إلى أعلى . وذلك لو كان متجها في الاتجاه الصحيح . هل من الممكن الإمساك بمنطاد عن طريق إمرار تيار هائل خلال قضيب معدني مثبت بالمنطاد ؟ ناقش هذا الأمر .

٩ - قذف جسم موجب الشحنة وقادم من الفضاء نحو خط الاستواء للأرض على طول خط نصف قطري متعامد مع المحور المغناطيسي للأرض . صف حركة هذا الجسم . اوجد بالتقريب (لأقرب قوى العشرة) مقدار السرعة التي يجب أن تكون لدى بروتون ليصل إلى الأرض على طول مثل هذا الخط لو أهملنا تصادماته مع جزيئات الهواء . كرر العملية بالنسبة لجسيم مقذوف على طول المحور .

١٠ - قدر أثر المجال المغناطيسي للأرض على الشعاع الالكتروني في جهاز تليفزيون .

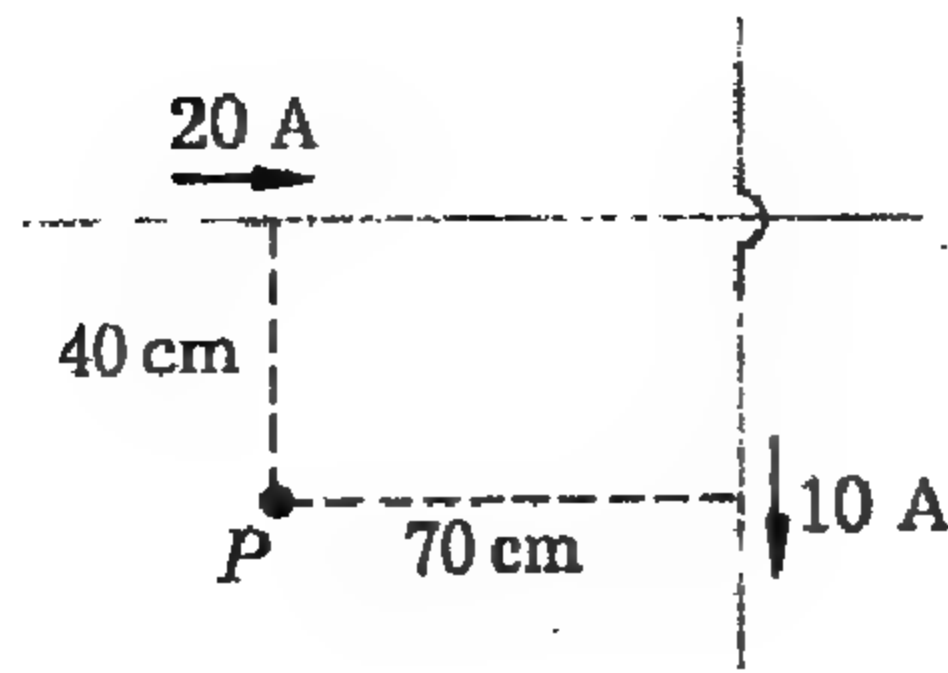


(b)



(a)

- ١ - يحمل خط قدرة (power line) مواز لسطح الأرض تياراً قدره 20 A في اتجاه الغرب . وكان المجال المغناطيسي للأرض عند تلك النقطة 0.80 G موازاً لسطح الأرض ومتجهاً شمالاً .
(أ) اوجد القوة الناشئة عن المجال والمؤثرة على طول من السلك يبلغ 15 m . (ب) ماهو اتجاه القوة ؟
- ٢ - أعد المسألة رقم (١) إذا كان السلك الذى يحمل تياراً يصنع زاوية 30° شمال الغرب .
- ٣ - في شيامى بفلوريدا يكون المجال المغناطيسى للأرض شمالياً تقريباً ولكنه يصنع زاوية مقدارها 57° أسفل خط الأفق (زاوية الميل 57°) ، ويبلغ مقداره حوالى 0.51 G . اوجد (أ) مقدار القوة التى يسببها هذا المجال على سلك طوله 15 m يحمل تياراً مقداره 20 A يتجه مباشرة إلى أعلى . (ب) ماهو اتجاه هذه القوة
- ٤ - يحمل خط خاص للقدرة (power line) تياراً منتظماً قدره 50 A تحت جهد 1000 V مواز للأرض ويتجه شمالاً فإذا كان المجال المغناطيسى للأرض يبلغ 0.60 G عند تلك النقطة وكانت زاوية الميل 53° ، (أ) اوجد القوة المؤثرة على طول من سلك قدره 3 m ، (ب) ماهو اتجاه هذه القوة ؟
- ٥ - يحمل سلك طويل مستقيم تياراً قدره 12 A في اتجاه الغرب مباشرة على طول أرضية منزل ما . (أ) ماهى قيمة B على مسافة قدرها 2 m فوق السلك ؟ (ب) ماهو اتجاهها ؟
- ٦ - ماهى قيمة B داخل ملف لولبى طويل يحتوى على 1000 لفة وطوله 50 cm ، إذا كان يحمل تياراً قدره 3 A ؟
- ٧ - يبلغ نصف قطر ملف حلقي ضيق 10 cm وكان هناك 200 لفة من السلك عليه . ماهو مقدار التيار المار فيه إذا كانت B بداخله تساوى 0.5 wb/m^2 ؟
- ٨ - إذا كان الملف الحلقى في المسألة رقم (٧) ملفواً على قلب حديدى بحيث كانت $\mu/\mu_0 = 300$ فماهى قيمة التيار الذى يحدث B مقدارها 0.50 T ؟
- ٩ - ملف لولبى خاص ذو قلب هوائى يبلغ طوله 2.0 m ويحتوى على $10,000$ لفة من السلك الملفوف حوله ، وكان قطر مقطعه يساوى 3.0 cm . (أ) إذا مر تيار قدره 5.0 A فى السلك فما هو مقدار كثافة التدفق المغناطيسى في الجزء الأوسط من الملف اللولبى ؟ (ب) كرر الحسابات إذا كان الملف اللولبى قد لف حول قلب حديدى وكانت $\mu = 50\mu_0$ (ج) ماهو التدفق الذى يمر خلال الملف اللولبى في الجزء (أ) ؟
- ١٠ - يحمل سلك مستقيم تياراً قدره 10 A ويقع على طول محور ملف لولبى طويل وكانت B بداخله تبلغ 0.2 Wb/m^2 . ماهو مقدار القوة المؤثرة على طول 1.0 cm من السلك ؟
- ١١ - يحمل سلكان متوازيان طويلان ومستقيمان ، المسافة بينهما 10 cm تيارات تبلغ 10 A ، 20 A في اتجاهين متضادين . (أ) ماهى قيمة B الناشئة عن السلك الذى له 10 A عند موضع السلك الآخر ؟ (ب) اوجد مقدار واتجاه القوة على طول 1 m من السلك الذى يحمل 20 A (ج) كرر الجزء (ب) للسلك الآخر .
- ١٢ - اوجد قيمة B في منتصف المسافة بين سلكين طويلين مستقيمين ومتوازيين (بينهما مسافة 20 cm) إذا كانا يحملان تيارات قدرها 10 A ، 20 A في (أ) اتجاهين متضادين و(ب) في نفس الاتجاه .
- ١٣ - * يحمل سلك مستقيم طويل تياراً قدره 20 A على طول محور ملف لولبى يبلغ المجال المغناطيسى بداخله 5.0 G (في حالة غياب السلك) . اوجد مقدار المجال المغناطيسى على مسافة تبلغ 0.4 m من محور الملف اللولبى . نصف قطر الملف اللولبى 0.5 cm .
- ١٤ - اوجد قيمة B عند النقطة P في شكل (م ١٩ - ٣)

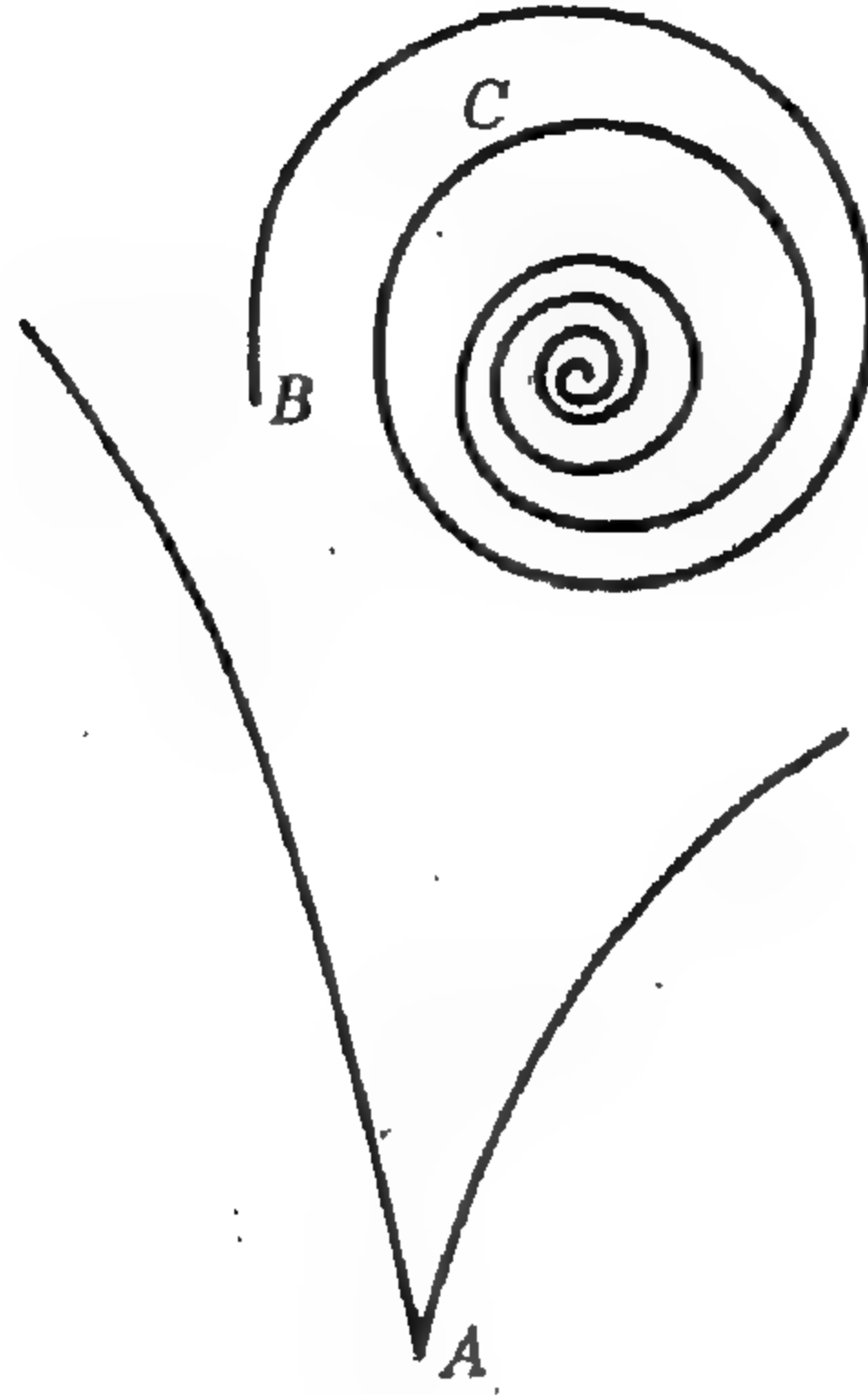


شكل م ١٩ - ٣

- ١٥ - * بالنسبة للموقف المبين في الشكل م ١٩ - ٣ ، اين يكون المجال المغناطيسى صفرا ؟
- ١٦ - يتحرك الكترون بسرعة مقدارها 10^7 cm/s فيدخل في مجال مغناطيسى منتظم ($B = 0.020 \text{ T}$) في اتجاه متعامد مع المجال . صف المسار الذى يسلكه الالكترن بطريقة كمية .
- ١٧ - ينحدر بروتون من السكون خلال فرق للجهد مقداره $3.34 \times 10^5 \text{ V}$ ثم يدخل منطقة بحيث يكون متعامدا مع مجال مغناطيسى $B = 0.50 \text{ Wb/m}^2$. ماهو مقدار نصف قطر الدائرة التى يتحرك فيها البروتون ؟
- ١٨ - عجل بروتون خلال فرق مجهول للجهد ثم دخل منطقة ما عموديا على مجال مغناطيسى قدره $2.00 \times 10^{-2} \text{ Wb/m}^2$ متخذ مسارا دائريا نصف قطره 30.0 cm ماهى طاقة البروتون معبرا عنها بوحدات الالكترن- فولت ؟
- ١٩ - صف بطريقة كمية مسار الكترون يتحرك بسرعة مقدارها 10^7 m/s نحو الغرب موازيا للأرض حيث كانت $B = 0.5 \text{ G}$ وكانت زاوية الميل 53° .
- ٢٠ - * يبلغ المجال المغناطيسى في ملف لولبي طويل 30 G . قذف الكترون إلى داخل الملف بزاوية مقدارها 10° مع محور الملف اللولبي بسرعة مقدارها $5 \times 10^6 \text{ m/s}$ فاتخذ مسارا حلزونيا . ماهو نصف قطر وخطوة الحلزون ؟
- ٢١ - * يتحرك بروتون بسرعة مقدارها 10^5 m/s فيدخل الى حيز من الفراغ حيث يوجد مجال مغناطيسى مقداره 0.100 T . تصنع سرعة البروتون زاوية مقدارها 30° مع اتجاه B . صف مسار البروتون بطريقة كمية . تلميح حلل السرعة الى مركبتين احدهما عمودية والاخرى موازية للمجال . المركبة الموازية لن تتفاعل مع المجال ، أما العمودية وحدها فستجعل الجسم يتحرك في دائرة .
- ٢٢ - * لقد وجد أن شعاعا معيناً من الالكترونات يتحرك في خط مستقيم خلال مجالين متقاطعين احدهما مغناطيسى والاخر كهربائى في مكثف كالموضح في الشكل ١٩ - ١٣ . كانت قيمة B تبلغ 0.050 Wb/m^2 وكانت المسافة بين اللوحين 10 cm وفرق الجهد بينهما 100 V اوجد (أ) سرعة الالكترونات (ب) نصف قطر الدائرة التى ستتحرك فيها الالكترونات عند خفض فرق الجهد بين اللوحين الى الصفر .
- ٢٣ - * قذف شعاع الكترونى اسطوانى ضيق خلال أنبوبة تليفزيون فكون نقطة من الضوء على الستار ، فاذا كان التيار الذى يحمله الشعاع هو 0.10 mA فاجد (أ) عدد الالكترونات التى تصدم الستار كل ثانية ، (ب) قيمة B على بعد نصف قطر قدره 2 cm من الشعاع . (ح) بالنسبة لشخص يشاهد التليفزيون هل يدور B مع عقرب الساعة أم ضدهما حول الشعاع كمحور ؟
- ٢٤ - * عندما يقذف جسم يتحرك بسرعة كالكترن خلال ايديروجين سائل فوق مسخن فإن فقاعات تتكون على طول مسار الجسم . بين الشكل م ١٩ - ٤ مسارات لجسيمات متعددة في مثل حجرة الفقاعات تلك . تبين المسارات بسبب المجال المغناطيسى العمودى على الصفحة والمتجة الى داخلها . اعتبر أن المجال يساوى 20 G . هل الجسم الذى يغادر النقطة A يتحرك نحو اليمين موجب أم سالب ؟ اذا اعتبرنا أنه الكترون فما هى سرعته بالتقريب ؟ (الآثار الميئة لها نفس الحجم الفعلى ولنا أن نعتبرها في مستوى الصفحة) .

٢٥- * يطيء الجسم الذى يبدأ من B فى الشكل م ١٩ - ٤ حين يتحرك خلال الأيدروجين السائل ونتيجة لهذا يلتف حلزونياً للداخل . باعتبار نفس البيانات المذكورة فى المسألة (٢٤) واعتبار الجسم الكتروناً ، فما هى سرعته عند C ؟

شكل م ١٩ - ٤



الفصل العشرون

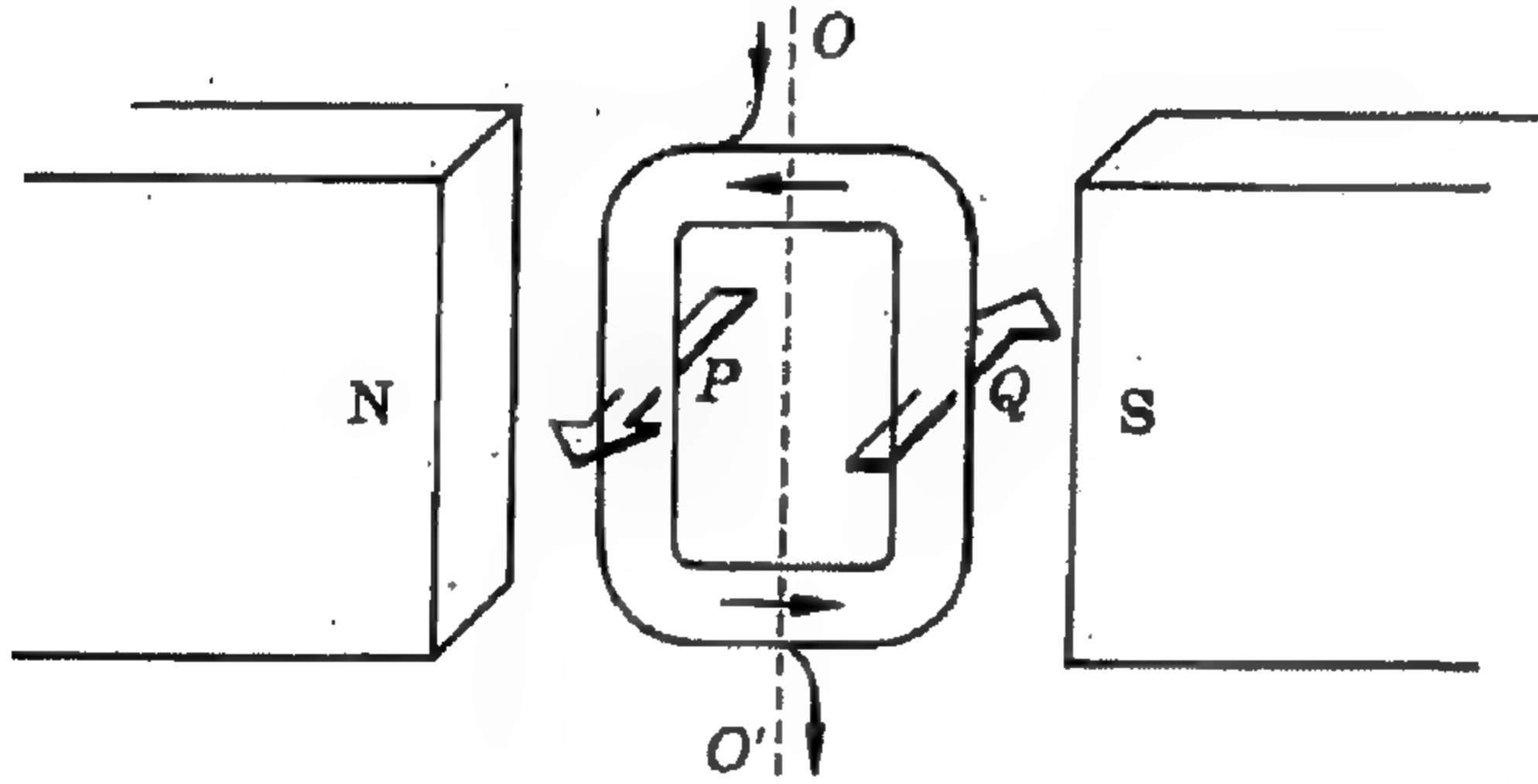
الأجهزة الميكانيكية الكهربائية

رأينا في الفصل السابق أن السلك الذى يحمل تيارا خلال مجال مغناطيسى يتعرض لقوة ما ، ويستفاد من هذه الحقيقة فى عمل أجهزة القياس الكهربائية والمحركات وكذلك فى كثير من الأجهزة الكهربائية . سنناقش فى هذا الفصل عمل بعض هذه الأجهزة وسنبحث أيضا كيفية جعل تيار يمر فى ملف ما عن طريق تغيير التدفق خلاله . تعتبر هذه الظاهرة أساسية لفهم المولدات الكهربائية وكذا فى عمل المحاثات . ستظهر أهمية التيارات والجهد المستحث فى الفصل القادم حين نبدأ فى دراسة التيارات المترددة ودوائر الرنين .

٢٠ - ١ الجلفانومتر

تعتبر معظم أجهزة المعامل من اميترات وفولتميترات جلفانومترات معدلة وتعمل جميعا بنفس الطريقة من حيث المبدأ . تتكون هذه الأجهزة - بالضرورة - من ملف من السلك معلق في مجال مغناطيسي . حين يسري التيار في السلك ، يتعرض الملف لقوة نتيجة لتفاعل التيار مع المجال المغناطيسي وتعمل هذه القوة على إدارة الملف ، وتستخدم الحركة الدورانية للملف كمقياس للتيار الذي يمر فيه .

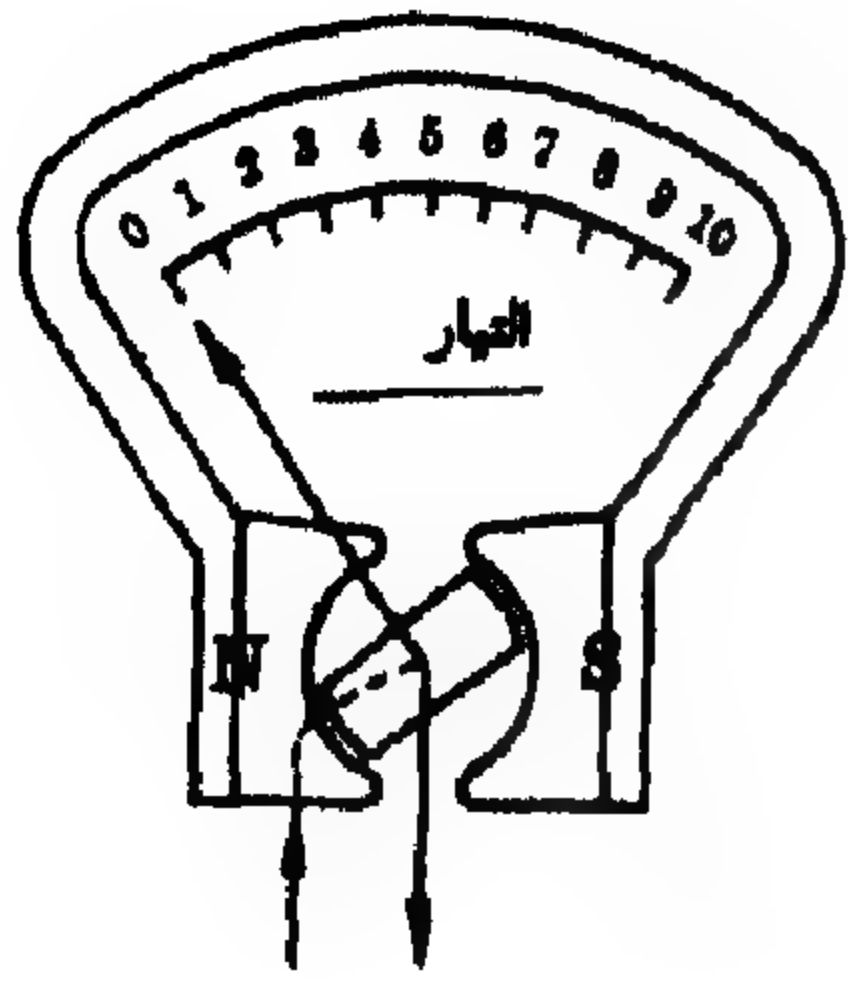
يبين الشكل ٢٠ - ١ رسما تخطيطيا لملف جلفانومتر . يمر التيار في السلك العلوى ، دائرا حول العرى العديدة للملف ثم يخرج من السلك السفلى . ويكون تركيب الملف بطريقة معينة بحيث يدور حول الخط OO' كمحور . يقوم المغناطيس الدائم بخلق مجال B من اليسار إلى اليمين عبر الملف . ولما كان الجزء العلوى والسفلى للملف يحملان تيارا موازيا للمجال المغناطيسى ، فإن $B_{\perp} = 0$ والقوة المؤثرة عليهما تساوى صفرا .



شكل ٢٠ - ١
يقوم التيار المار في ملف
الجلفانومتر بجعل الملف
ينحرف في المجال المغناطيسى

تفيدنا قاعدة اليد اليمنى لإيجاد القوى المؤثرة على الأسلاك بأن الجانب P للملف سيتعرض لقوة متجهة خارج الصفحة ، أما الجانب Q فيتعرض لقوة متجهة لداخل الصفحة . على الرغم من أن هذه القوى هي بالضرورة متساوية ومتضادة إلا أنها تؤثر بعزم لى على الملف . عند دوران الملف يقوم بلى زنبرك ، يقوم بدوره بمعاكسة دوران الملف . ويكون عزم لى الاستعادة الذى يسببه الزنبرك مساويا لعزم اللى الذى يسببه التيار المار في الملف . حيث أن القوة المؤثرة على السلك ومن ثم عزم اللى يتناسب طرديا مع التيار I ، لذا تتناسب الزاوية التى يدور بها الملف ضد زنبرك الاستعادة تناسبا طرديا مع I بشرط أن يخضع الزنبرك لقانون هوك .

هناك طرق مختلفة لملاحظة الزاوية التى يدور بها الملف ، فقد تثبت مرآة صغيرة على الملف في أكثر الجلفانومترات حساسية وعند عكس شعاع ضوئى على هذه المرآة



شكل ٢ - ٢٠
رسم تخطيطي للأميتر

تكون حركة هذا الشعاع متناسبة مع زاوية دوران الملف . وهناك نظام أكثر شيوعاً به فيه تثبيت إبرة على الملف وعند دوران الملف تنحرف الإبرة ويكون انحرافها - وهو دالة للتيار المار بالملف - مقياساً للتيار المار في ملف الجهاز بشرط أن يعاير تدريج الجهاز طبقاً لانحراف الإبرة . يوضح الشكل ٢٠ - ٢ منظرًا علويًا لأحد هذه الأجهزة .

نشاهد في حركة الجهاز المبين في شكل ٢٠ - ٢ أن أقطاب المغناطيس الدائم قد شكلت بطريقة خاصة حتى يكون المجال المغناطيسي موازياً لمستوى الملف أينما كان الملف أثناء دورانه بالزوايا المسموحة وهو بهذا يعطى عزم لي أكثر انتظاماً ، ويكون هناك عادة قلب حديدي للملف حتى يزيد من المجال المغناطيسي وحتى يكون تكملة لشكل الأقطاب . ويمكن بالتصميم الجيد جعل تدريج الجهاز بحيث يكون مقياساً خطياً تقريباً للتيار I كما هو مبين في الشكل .

تعتمد حساسية حركة الجلفانومتر ، أي مقدار الانحراف الناشئ عن كمية معينة من التيار ، على عدة عوامل . من أهم هذه العوامل كزازة (stiffness) زنبرك الاستعادة ، فلو كان على الجهاز أن يكون متيناً وقابلاً للحمل ، للزم ألا يكون الزنبرك رقيقاً أكثر من اللازم . تعتمد الحساسية أيضاً على عدد لفات السلك في الملف فلو ضعف هذا العدد لتضاعف تبعاً لذلك عزم اللى المؤثر على الملف .

يعطى الجلفانومتر شديد الحساسية انحرافاً ملح التدريج إذا مر به تيار يبلغ كسراً من ميكرو أمبير microampere ($10^{-6}A$) وتختصر μA فقط ، ومثل هذا الجلفانومتر شديد الحساسية يجب أن يحتوي على عدد كبير جداً من اللفات بالملف وتصل المقاومة فيه إلى 100Ω وحتى في هذه الحالة فإن فرقاً للجهد مقداره $10^{-4}V$ عبر طرفيه كفيل بجعل تيار قدره $10^{-6}A$ يمر خلاله . ولذلك فهو يستخدم كفلقيتر حساس بمثل ما هو أميتر أو جلفانومتر . تعطى الجلفانومترات التي تستخدم على المنضدة وهي شائعة في معامل الطلاب ، انحرافاً ملح التدريج عند مرور تيار يبلغ حوالي $1mA$ ($10^{-3}A$) وتكون مقاومتها 20Ω تقريباً .

٢٠ - ٢ الأميترات

الأميتر هو حركة جلفانومتر معدلة إذا أريد له أن يكون أميتر حساساً فقد يكون جلفانومتر دون تعديل . على أن معظم التعديلات تعطى انحرافاً ملح التدريج لتيارات تبلغ بضع ميللي أمبير أو أقل ولذا لا يمكن استخدامها مباشرة لقياس تيارات أكبر من هذا . افترض ، كمثال محدد ، أننا نريد صنع أميتر ينحرف ملح التدريج لتيار قدره $2A$. والحركة المستخدمة لها مقاومة قدرها 20Ω وتنحرف ملح التدريج لتيار قدره $3mA$ (أي أنها حركة $60mV$ ، أي $60 \times 10^{-3}V$ عبر طرفيها ستؤدي إلى تيار قدره $3mA$ يسري خلال الملف ليحرف الحركة ملح التدريج) .

لكي نصنع الاميتر المطلوب من هذه الحركة أو الجلفانومتر ، وجب أن نجد طريقة تسمح للتيار $2A$ أن يمر خلال جهاز القياس بينما لا يمر سوى $0.003A$ خلال الحركة ، ويمكن عمل هذا اذا صمم جهاز القياس كما في الشكل ٢٠ - ٣ ، حيث رسمت الحركة الفعلية أو الجلفانومتر كجهاز دائري مركزي مقاومته R_m .

حين يمر تيار مقداره $2A$ في هذا الجهاز عند النقطة A فاننا نريد $0.003A$ فقط أن تسري خلال الحركة ذات المقاومة R_m ، ويعنى هذا اننا يجب أن نصنع مقاومة صغيرة على التوازي مع الحركة حتى يمكن أن يمر خلالها $1.997 A$ يسمى هذا المقاوم الصغير مقاومة مجزئة ويشار اليها بالرمز R_s في الشكل ٢٠ - ٣ . ولحساب R_s نتبع الآتي :

تنحرف الحركة مع التدرج عندما يكون هناك فرق للجهد مقداره $60 \times 10^{-3} V$ بين طرفيها من A الى B . ولكن تحت نفس هذه الظروف يجب أن يحمل المقاوم المجزئ R_s تيارا قدره $1.997A$. باستعمال قانون أوم نجد أن

$$60 \times 10^{-3} = 1.997 R_s$$

أو

$$R_s \approx 0.030 \Omega$$

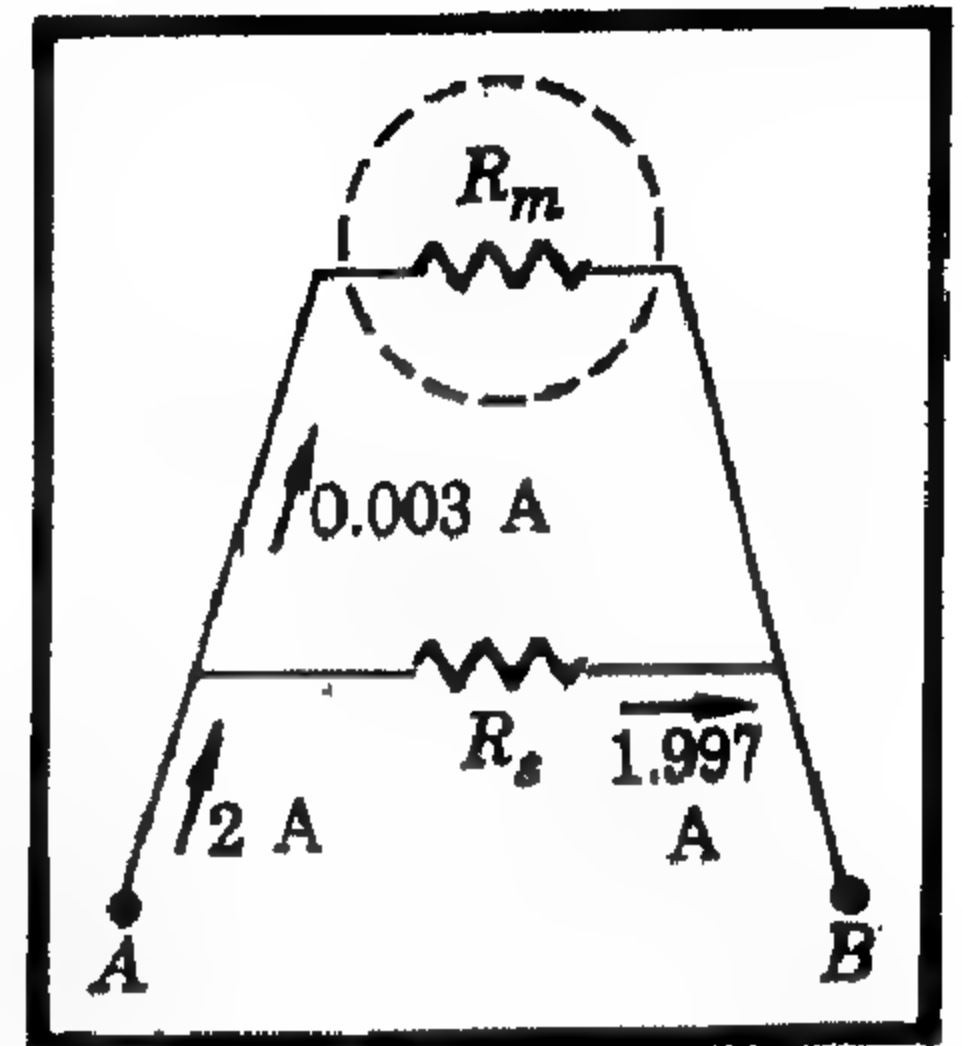
لاحظ ان المقاوم المجزئ صغير الى أقصى حد وهو دائما لا يعدو كونه قطعة من سلك نحاسي . علاوة على هذا تكون مقاومة الأميتر أقل من 0.030Ω وذلك لأن R_s متصلة على التوازي مع R_m للأميتر وهذا هو ما يجب أن يحدث لاننا لانريد للأميتر أن يسبب اضطرابا في الدائرة حين يوصل على التوالي لقياس التيار المار . (مالمذى يحدث لو أن هذا الاميتر وصل بطريق الصدفة عبر فرق للجهد مقداره $91V$)

كثيرا مانصادف أميترات ذات أكثر من مدى ولذا فهي تحتوى على عدة مجزئات متناوبة ، وتحدد حساسية جهاز القياس على أساس مجزئ التيار الذى يتصل عبر طرفيه .

٢٠ - ٣ الفولتميترات

يمكننا بناء فولتميتر من الحركة التى استخدمت في الفصل السابق لصنع أميتر . فتللك الحركة كانت تنحرف مع التدرج لتيار قدره $0.003 A$ وكانت مقاومتها 20Ω وعليه يكون فرق الجهد عبر طرفيها عند انحراف مع التدرج هو $(0.003) (20)$ أو $60mV$. لنستخدم هذه الحركة في تركيب فولتميتر $90V$.

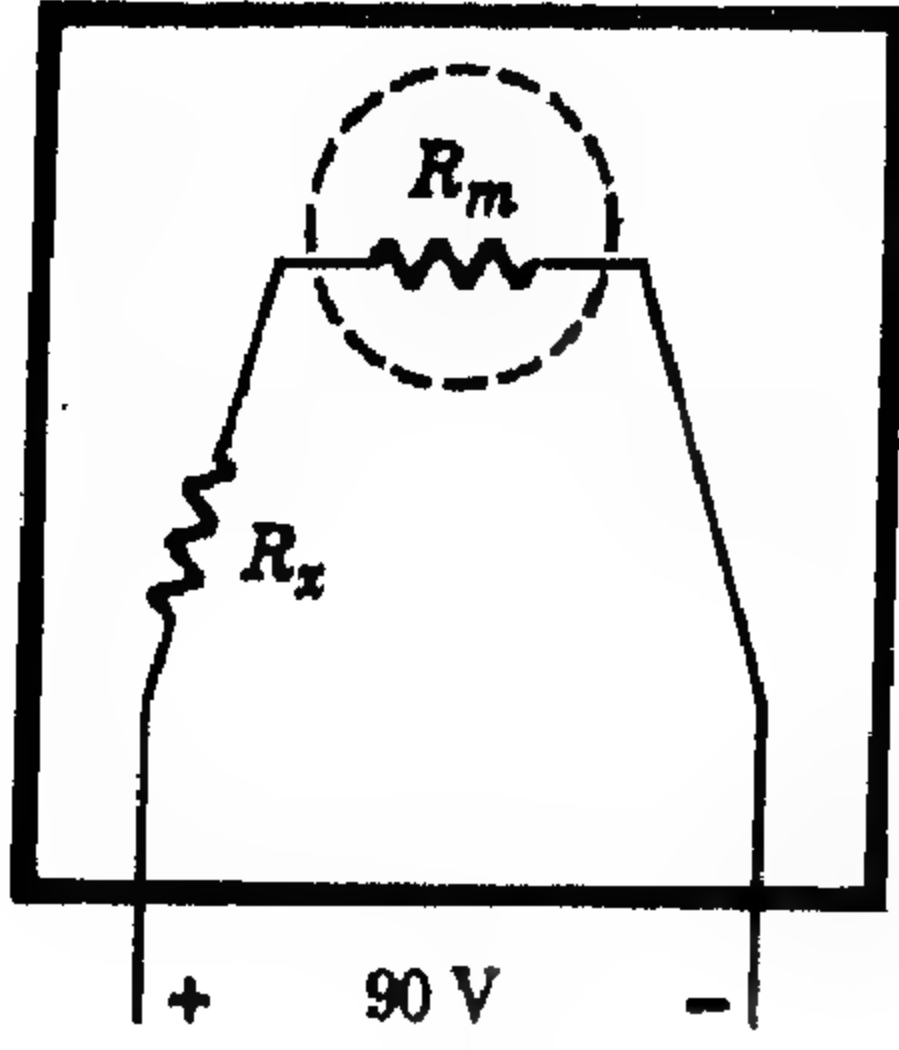
تركيب الاميتر



شكل ٢٠ - ٣

يمر جزء صغير من التيار فقط خلال الحركة المتصلة بالاميتر اما معظم التيار ليمر خلال مقاومة مجزئة للتيار

تركيب الفولتميتر



يوضح الشكل ٢٠ - ٤ دائرة مناسبة لهذا الغرض . عندما يكون فرق الجهد بين الأطراف 90V فإننا نريد أن يمر تيار قدره 0.003A خلال جهاز القياس . لإيجاد المقاومة R_x التي يجب وضعها على التوالي مع الحركة ، نطبق قانون أوم للدائرة التي في شكل ٢٠ - ٤ . لدينا

$$90 = (0.003)(20 + R_x)$$

وللحصول على R_x نجد

$$R_x = 29,980 \Omega$$

شكل ٢٠ - ٤
لعمل فولتميتر من حركة حساسة فإننا نضع مقاومة كبيرة بداخله .

من الواضح أن مثل هذا الجهاز له مقاومة عالية جدا . وحيث أننا نستعمل الفولتميتر بتوصيله عبر فرق الجهد فإننا نحتاج أن تكون مقاومته عالية جدا ، حتى لا يحدث أى اضطراب في الدائرة . وأفضل الفولتميترات تكون مقاومته أكبر بكثير من هذا الذى وصفناه ، فجهازنا يقال أن له مقاومة 29.980/90 أو 333 Ω/V . وهذا لايعنى أن المقاومة تختلف باختلاف قراءة التدرج . ولكنها تعطى النسبة فقط بين مقاومة الجهاز وأقصى قراءة في التدرج . إذا كان جهاز مشابه له حركة أكثر حساسية فإن مقاومته يجب أن تكون أكبر . (لماذا ؟) .

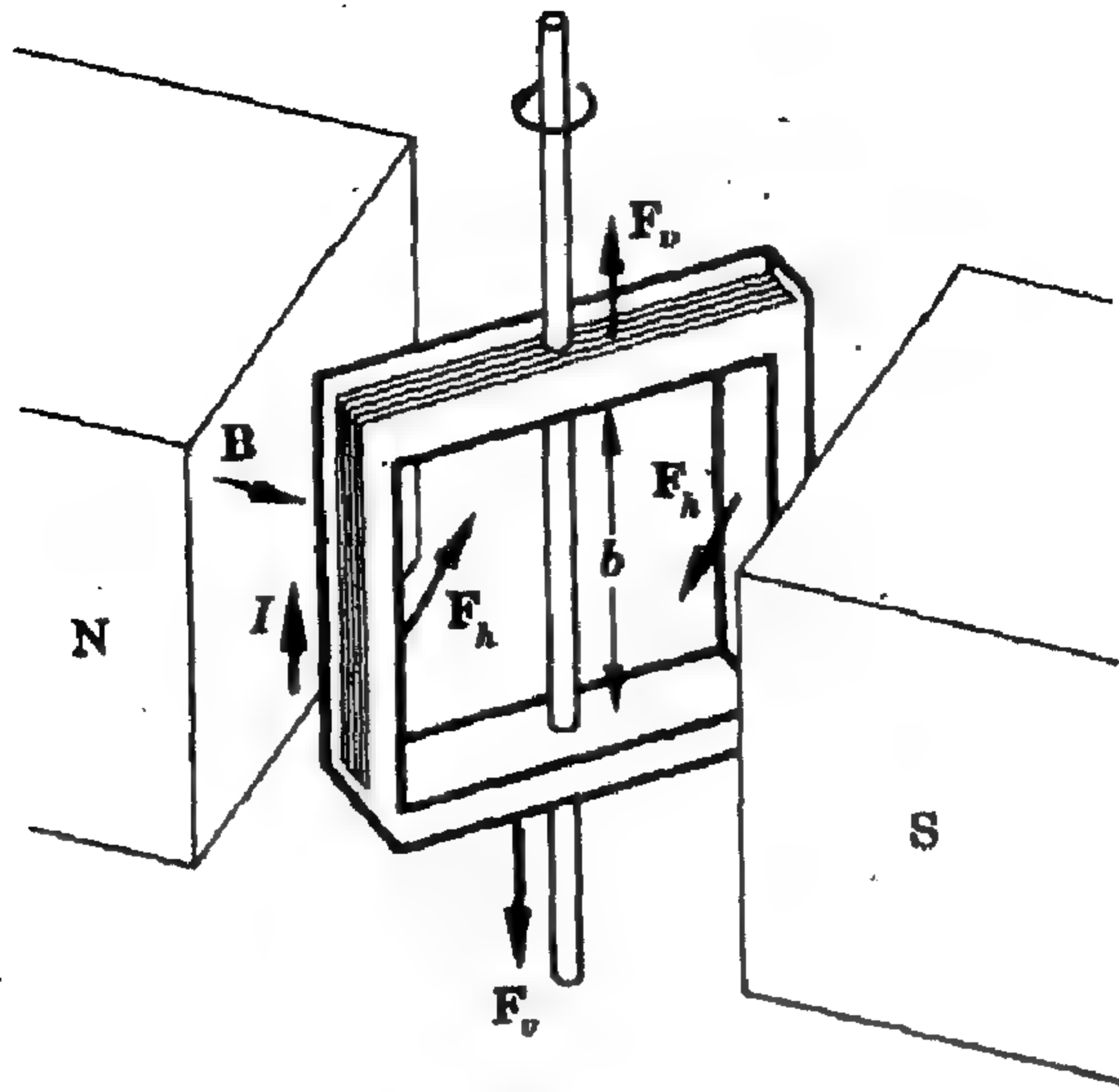
٢٠ - ٤ عزم اللي على عروة تيار

يعتمد عمل حركة جهاز للقياس على حقيقة أن الملف الحامل للتيار يتعرض لعزم لى أو دوران في مجال مغناطيسى كما وصفنا في القسم السابق ، وهذه الحقيقة أهمية كبرى لأنها الأساس في عمل كثير من الأجهزة بما في ذلك المحركات الكهربائية ، ولهذا السبب سنقوم بفحص عزم اللي على مثل ذلك الملف بطريقة كمية .

يوضح الشكل ٢٠ - ٥ أ موقفاً للملف يحمل تياراً في مجال مغناطيسى ، وكما هو مبين يركب الملف على محور بحيث يمكنه الدوران . باستعمال قاعدة اليد اليمنى ، يمكننا إيجاد القوى المؤثرة على الجوانب المختلفة والموضحة في الشكل . لاحظ أن هناك قوتين فقط F_A وهما اللتان تسببان عزماً لى حول محور الدوران . بل إنه حتى هاتين القوتين لا يمكنهما خلق أى عزم لى حين يكون مستوى الملف عمودياً على مجال المغناطيس . يحدث أقصى عزم لى حين تمرق خطوط B على سطح الملف أى حين تكون خطوط المجال واقعة في مستوى الملف ، وذلك لأن ذراع الرافعة للقوة F_A يكون وقتئذ عند أقصى قيمة له .

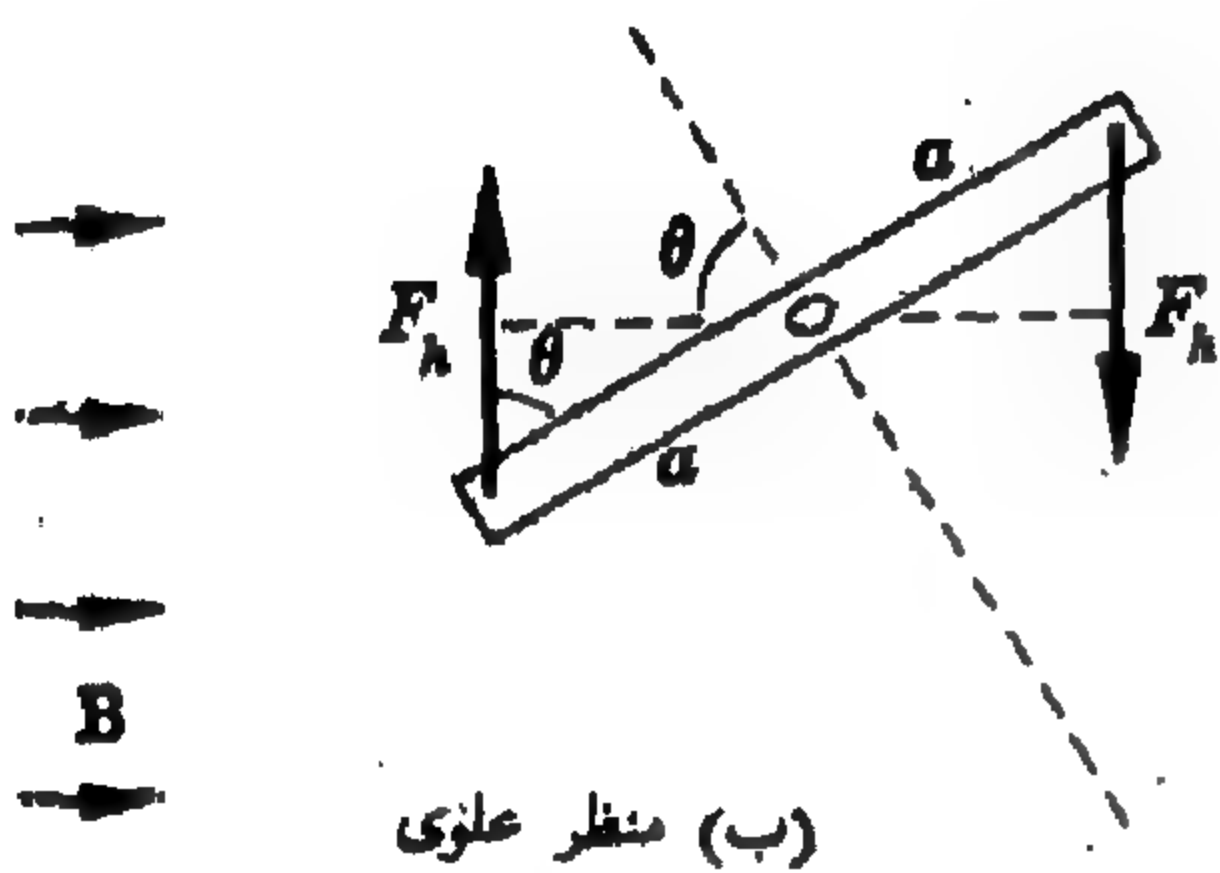
للحصول على تعبير كمي لعزم اللي على الملف نلاحظ أن كلا من القوتين F_A تعطى عزماً هو

$$(F_A) (F_A)$$

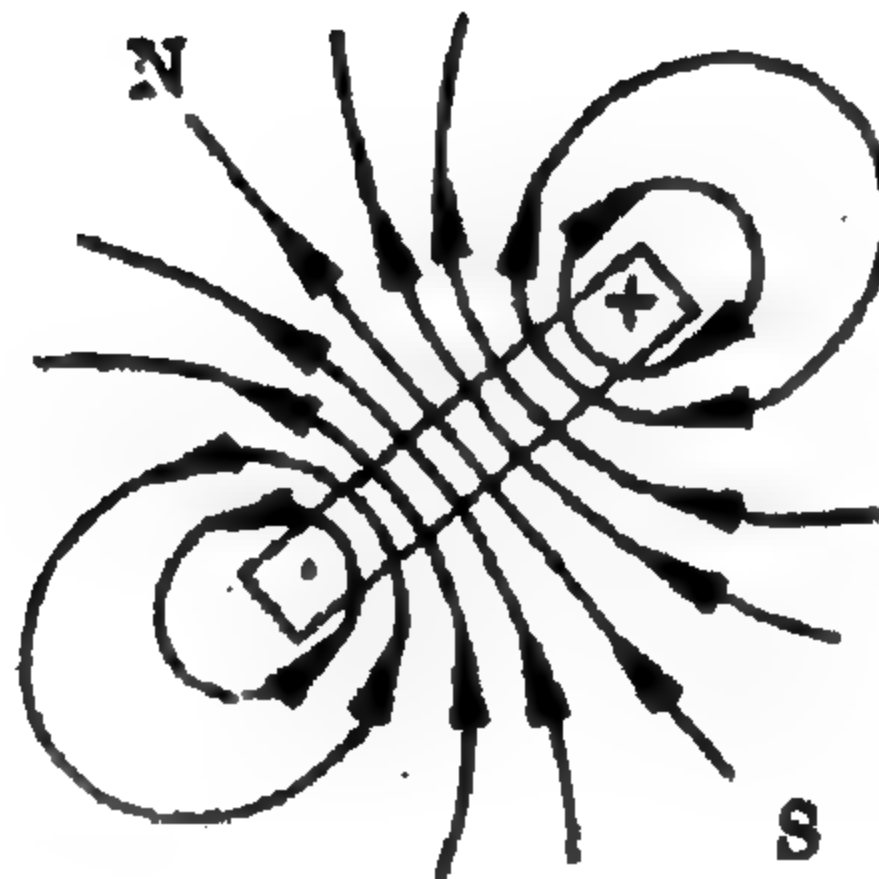


(أ) رسم منظوري

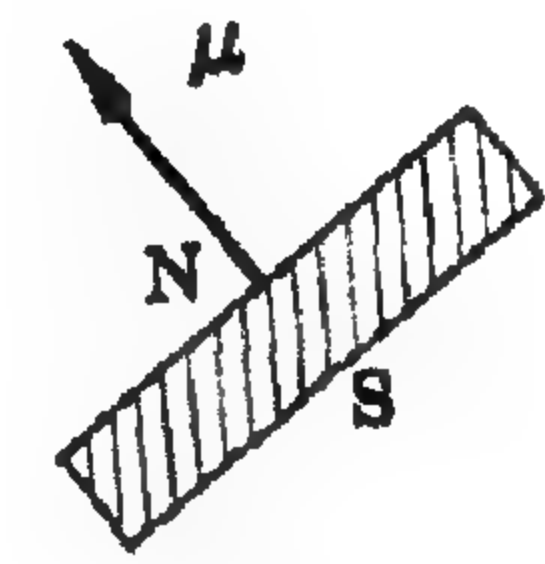
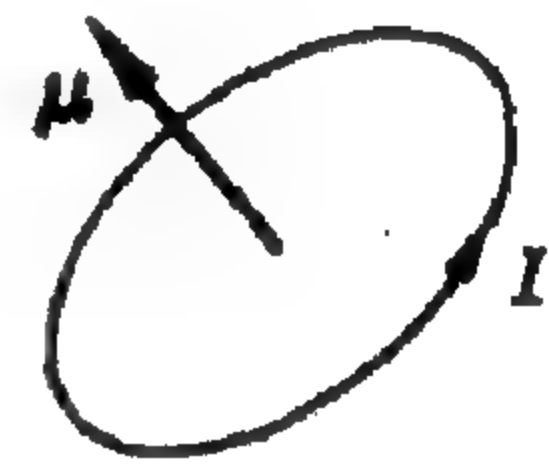
شكل ٢٠ - ٥
يتعرض الملف في (أ) لعزم لي
ولذا فهو يكافئ قضيبا
مغناطيسيا قصيرا كالذي في
(د)



(ب) منظر علوي



(ج) مجال (ب)



(د) المغناطيس المكافئ

ومن الشكل ٢٠ - ٥ ب نرى أن ذراع الرافعة هو $a \sin \theta$ حيث θ هي الزاوية المبينة
وعلى هذا يكون عزم اللي على الملف هو

$$\text{عزم اللي} = 2F_h a \sin \theta$$

ولكن F_h هي ببساطة القوة المؤثرة على الجانب الرأسى للملف ، فلو أن طول هذا
الجانب كان b وكان التيار I فإن كل سلك رأسى سيساهم بقوى مقدارها BIb في
 F_h ولما كان هناك N عروة بالملف فإن $F_h = NBIb$ ويكون عزم اللي هو :

$$\text{عزم اللي} = (2ab)(NI)(B \sin \theta)$$

عزم اللي على ملف

لاحظ ان المقدار $2ab$ هو ببساطة مساحة الملف ، ولذا يمكن كتابة .

$$(\text{عزم اللي}) = (\text{المساحة}) (NI) (B \sin \theta) \quad (٢٠ - ١)$$

على الرغم من أننا قد اشتققنا المعادلة (٢٠ - ١) لملف ذي شكل خاص جداً إلا أن هذه المعادلة صحيحة لجميع الملفات المسطحة (flat)، حيث أن NI هو التيار المار حول الملف ، فإننا نرى أن أهم ملامح الملف (إلى جانب اتجاهه) مساحة الملف والتيار المار به ، وفي ضوء هذا يكون من المعتاد دائماً أن نعرف كمية تسمى العزم المغناطيسى لعروة التيار :

$$\mu = \text{العزم المغناطيسى} = (\text{المساحة}) (I) \quad (١)$$

العزم المغناطيسى

هناك فائدة محددة للتفكير في عروة التيار على أنها قضيب مغناطيسى يتميز بعزمه المغناطيسى كما سنرى الآن .

لقد أشرنا إلى أن عروة التيار يكون لها مجال مغناطيسى يشبه ذلك الذى لقضيب مغناطيسى وقد أعدنا رسم هذا فى الشكل (٢٠ - ٥ جـ)، حيث يبدو الملف كقضيب مغناطيسى قصير وسيميك وله قطبان ، شمالى وجنوبى كما هو مبين ، وهذا التشابه مشار إليه مرة ثانية فى الشكل ٢٠ - ٥٥ . علاوة على ذلك إذا رجعنا الى الشكلين (أ) ، (ب) فإننا نرى أن الملف نفسه يتعرض لعزم لى يشبه ذلك المؤثر على القضيب المغناطيسى المكافئ له . فى الجزء (أ) ، مثلاً ، سيتصرف الملف كما لو كان قضيباً مغناطيسياً ، قطبه الشمالى عند الجانب الأقصى للملف ، وحيث أن هذا الجانب قريب من القطب الشمالى للمغناطيس الذى ينشئ المجال الخارجى ، لذا فإن الملف يدور فى الاتجاه المبين هنالك .

للإفادة الكاملة من هذا التشابه فائنا نعطى العزم المغناطيسى μ اتجاهها ونجعل منه متجهها كما هو مبين فى الشكل ٢٠ - ٥٥ . يكون اتجاه μ عمودياً على مساحة العروة ويتحدد حسب قاعدة اليد اليمنى ، بمعنى أن الأصابع تلتف فى اتجاه التيار I ، أما الإبهام فيشير على طول μ نتيجة لهذا يشير متجه العزم المغناطيسى μ بحيث يكون خارجاً من القطب الشمالى للمغناطيس المكافئ ويستتبع هذا النتيجة الهامة التالية :

عندما توضع عروة تيار فى مجال مغناطيسى ، فإنها تدور بحيث ينطبق متجه العزم المغناطيسى لها مع متجه المجال المغناطيسى .

ويمكننا أن نقدر صحة هذه النتيجة حين تذكر أن إبرة البوصلة هى ببساطة قضيب مغناطيسى وأن اتجاه المجال يعرف بأنه ذلك الاتجاه الذى تتخذه الإبرة . وسنجد من المناسب - من وقت لآخر - أن نفكر فى عروة التيار على أنها مغناطيس له عزم مغناطيسى μ .

يشكل عزم الى على عروة التيار أهمية خاصة بالنسبة للمحركات الكهربائية ، ولكن قبل أن تناقش عمل المحركات من المهم أن نفهم المبدأ الذى يقوم على أساسه المولد . سنرى أن المبدأ نفسه قائم فى حالة المحركات ويؤثر على سلوكها الكهربائى ، كما سترى فى القسم الثانى كيف أن المولد الكهربائى يقوم بإنتاج فرق للجهد .

مثال توضيحي ٢٠ - ١ افترض نيلز بوهر فى عام ١٩١٣ الصورة المعقولة والناجحة التالية لذرة الأيدروجين . عند مركز الذرة يوجد بروتون شحنته $1.6 \times 10^{-19} +$ وكتلته 1.67×10^{-27} . يبلغ قطر البروتون حوالى 10^{-15} m . يدور الكترون حول البروتون وعلى مسافة $0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$ كنصف قطر للمدار . تبلغ شحنة الالكترن $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ وكتلته $1/1840$ من كتلة البروتون . استنتج بوهر أن الالكترن يدور حول النواة 6.6×10^{15} مرة فى الثانية الواحدة . وهذه الحركة الدائرية للالكترن المشحون تكافئ تيارا يمر فى عروة من السلك اوجد العزم المغناطيسى لذرة الأيدروجين والناشئ عن الحركة المدارية لالكترونها .

طريقة الحل : العزم المغناطيسى μ حسب التعريف - هو IA حيث A مساحة العروة ؛ وهى

$$A = \pi r^2 = (\pi)(0.53 \times 10^{-10})^2 \text{ m}^2 = 0.88 \times 10^{-20} \text{ m}^2$$

لايجاد I نعلم أن التيار فى عروة يساوى الشحنة المارة عبر نقطة ما فى الثانية ، وبالنسبة للحالة الراهنة يدور الالكترن حول الذرة 6.6×10^{15} مرة فى الثانية وهو يحمل شحنة مقدارها $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ماراً بنقطة معينة ذلك العدد من المرات فى الثانية الواحدة ، ومن ثم ،

$$I = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(6.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) = 1.05 \times 10^{-3} \text{ A}$$

وعلى هذا تقوم الذرة بعمل مغناطيس صغير دى عزم مغناطيسى ،

$$\mu = IA = 9.3 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

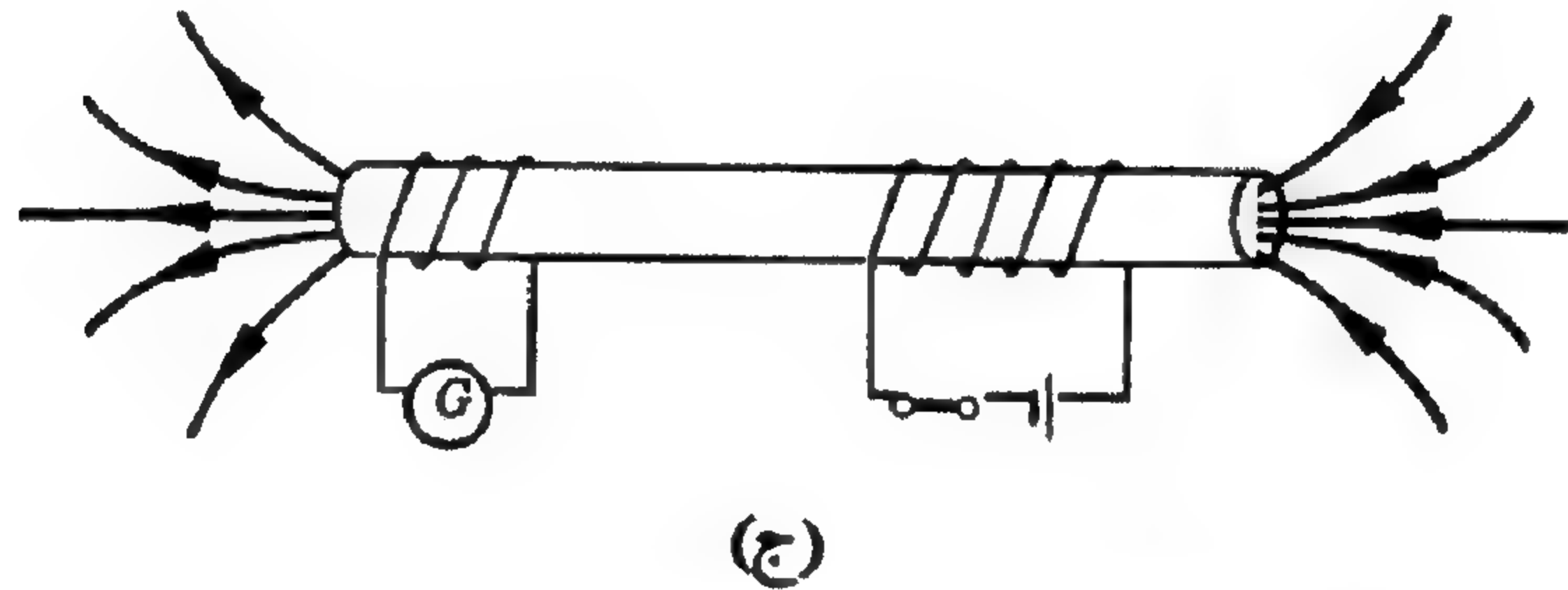
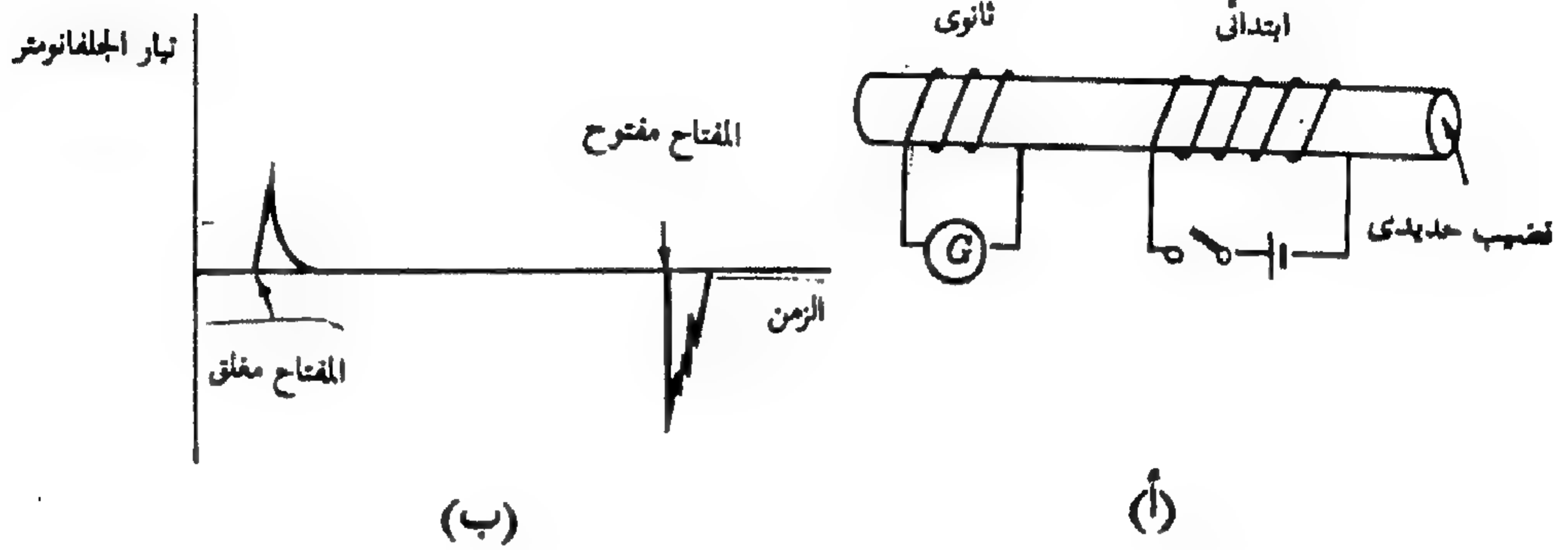
حين أصبحت الأساليب التقنية متاحة لإجراء قياسات للعزم المغناطيسى للذرة فإن هذه القيمة المتوقعة قد تأكدت تماما . على أنه بالإضافة إلى هذا كان الالكترن نفسه يتصرف كمغناطيس صغير وصور هذا كنتيجة للحركة التدويرية للالكترن المشحون حول محور يمر خلال مركز الالكترن

٢٠ - ٥ ق . د . ك . المنتجة بالحث

شكل ٢٠ - ٦

يوجد تيار مستحث في الملف الثانوي عندما يتغير التيار في الملف الابتدائي فقط وتكون نبضات التيار في الواقع أضيق بكثير عما هو مرسوم في (ب) .

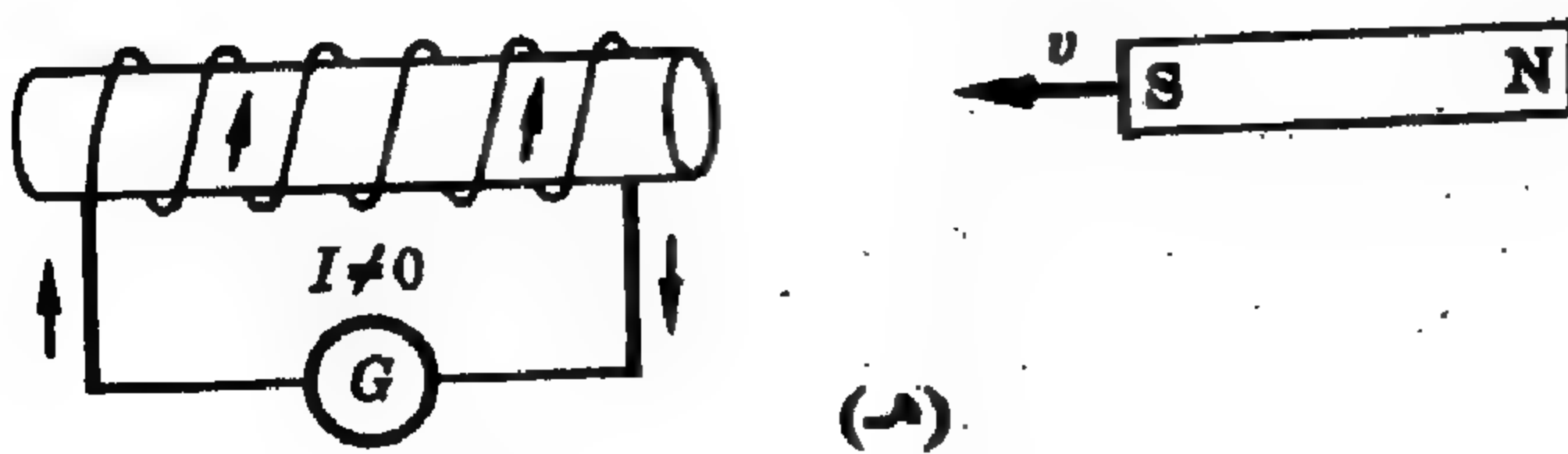
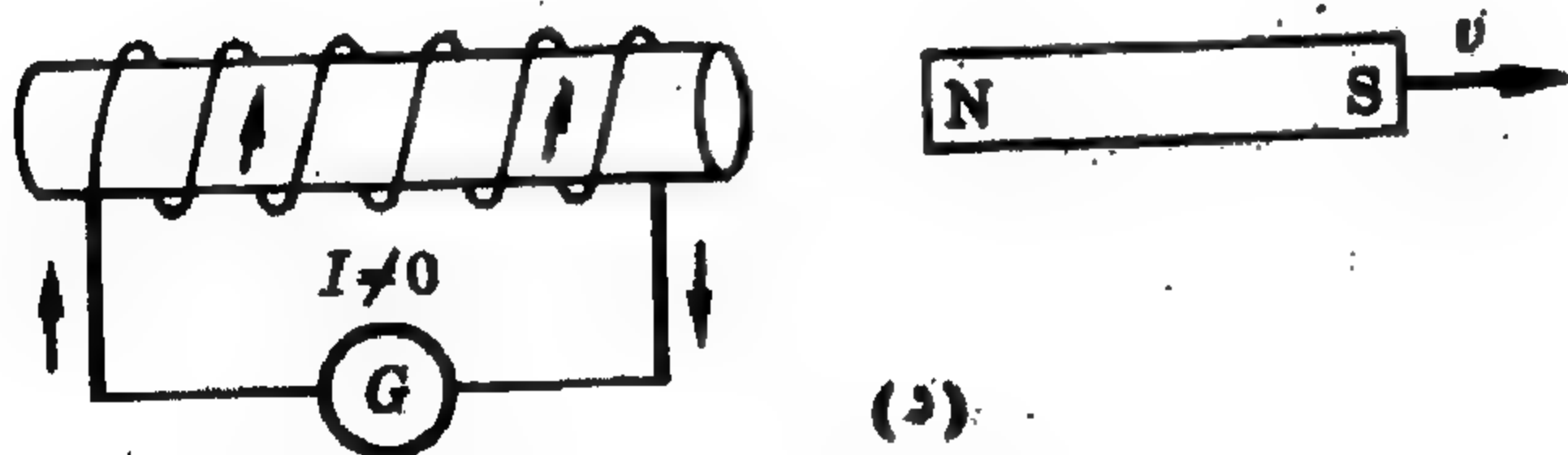
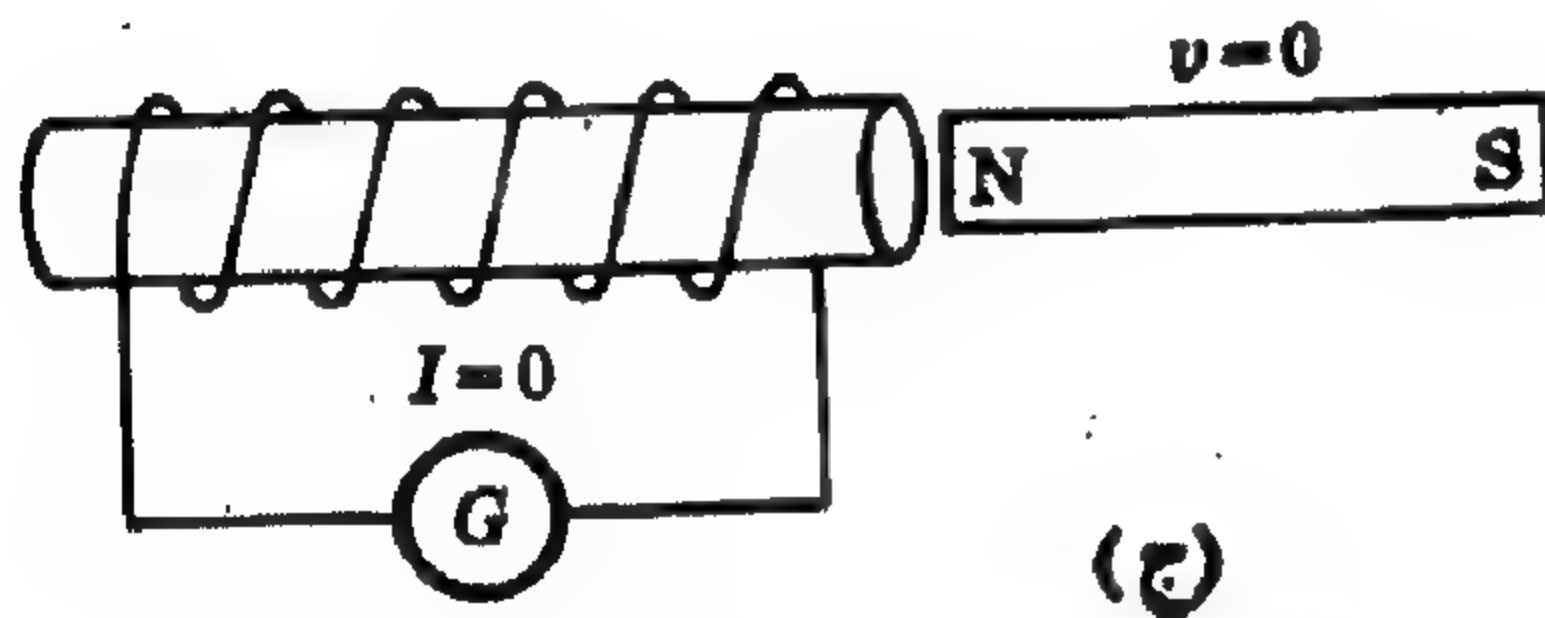
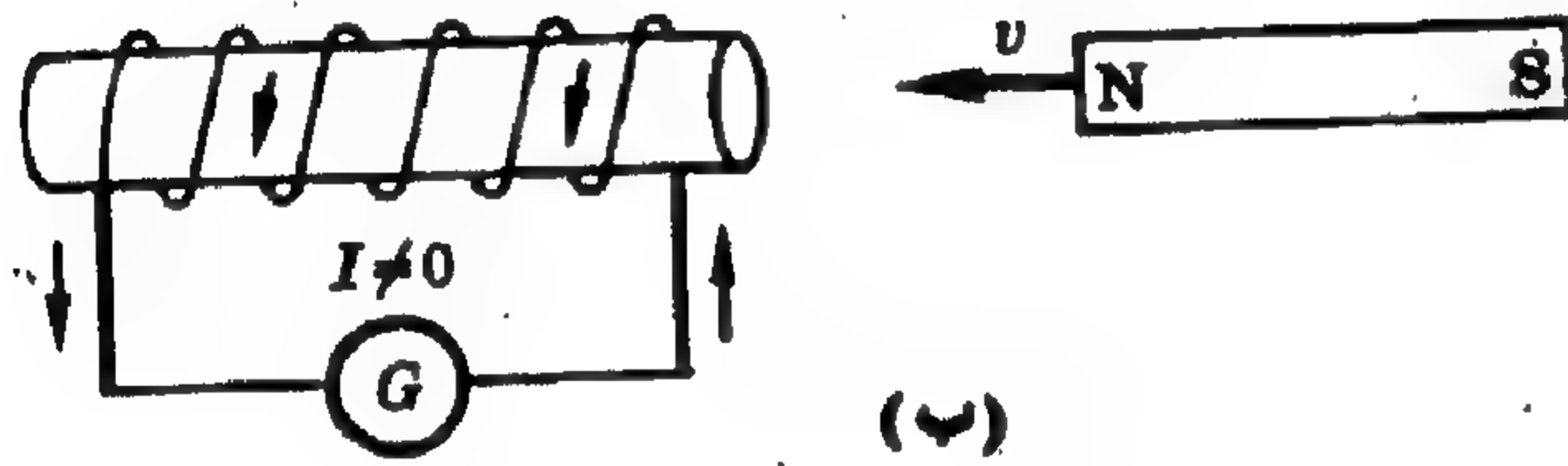
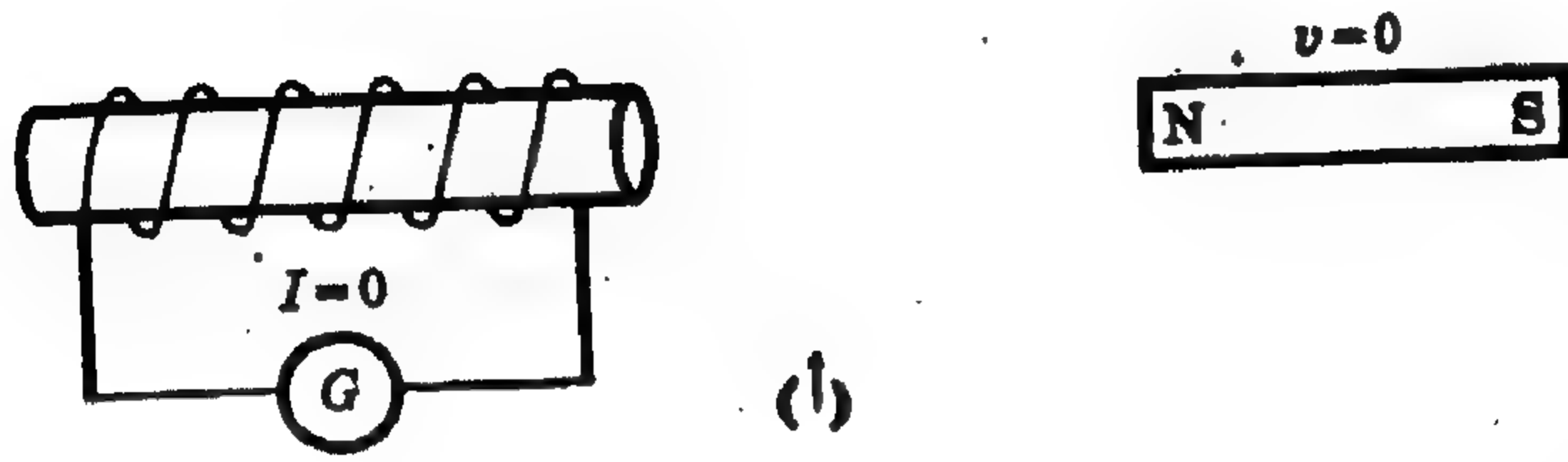
هناك تجربة أساسية وبسيطة يمكن إجراؤها باستخدام الجهاز المبين في شكل ٢٠ - أ . فهناك دائرتا توال بسيطتان : تتكون الأولى من بطارية ومفتاح على التوالي مع سلك طويل ثم لفة حول قضيب حديدي كما هو مبين ، سنسمى هذا الملف ملفاً ابتدائياً لأنه متصل بالبطارية . هناك أيضاً سلك مستقل ملفوف حول القضيب . يتصل هذا الملف بجلفانومتر ولا توجد في دائرته أية بطارية ، ويسمى الملف الثانوي .



حيث أن دائرة الملف الثانوي لا تحتوي على بطارية ، فقد يخمن الإنسان أن التيار المار بها سيكون دائماً صفراً ، ولكن تبرز حقيقة مذهلة عند إغلاق المفتاح أو فتحه في الدائرة الابتدائية بشكل فجائي ، وفي نفس هذه اللحظة ينحرف الجلفانومتر فجأة ثم يعود إلى الصفر أي أن تياراً يسرى في دائرة الملف الثانوي للحظة قصيرة ويبدو كما لو كانت الدائرة الثانوية قد امتلكت بطارية ، أو مصدر ق . د . ك ، للحظة قصيرة لذا نقول أن ق . د . ك . منتجة بالحث قد وجدت في الملف الثانوي .

يبين الشكل ٢٠ - ٦ ب سمة أخرى لهذا التيار المستحث وكذا ق . د . ك . فكما نرى هناك يسرى التيار ، قصير العمر في اتجاه معين حين يضغط المفتاح ليخلق ، ولكن ق . د . ك . تجعل نبضة التيار تسرى في الاتجاه المضاد حين يجذب المفتاح ليفتح . يدل هذا على أن اتجاه ق . د . ك . المنتجة بالحث يعتمد على ما إذا كان التيار في الملف الابتدائي متزايداً أو متناقصاً .

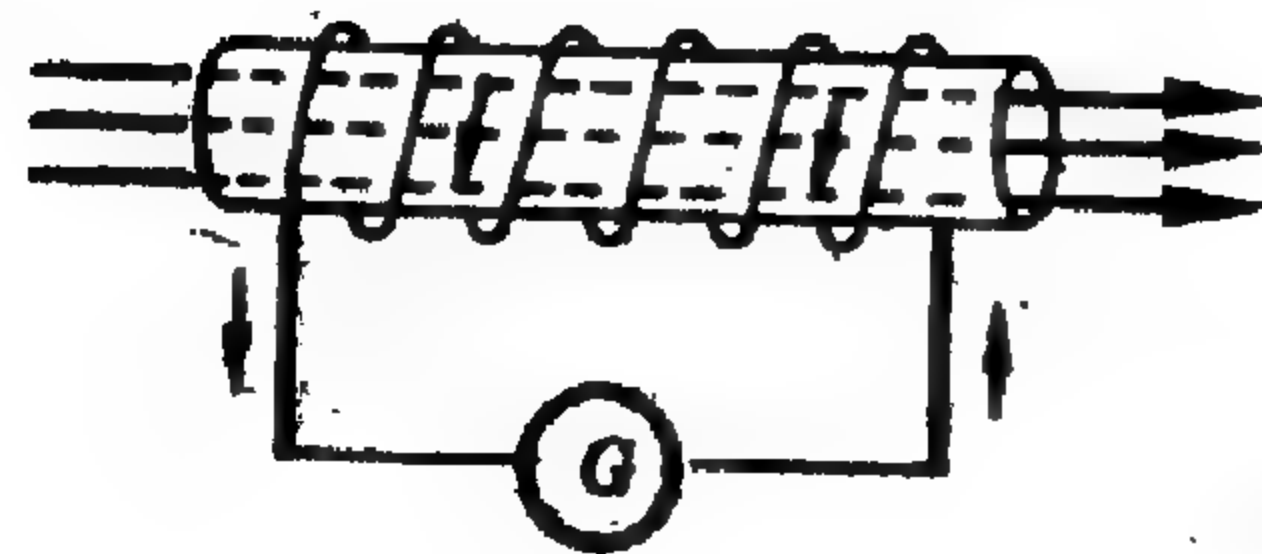
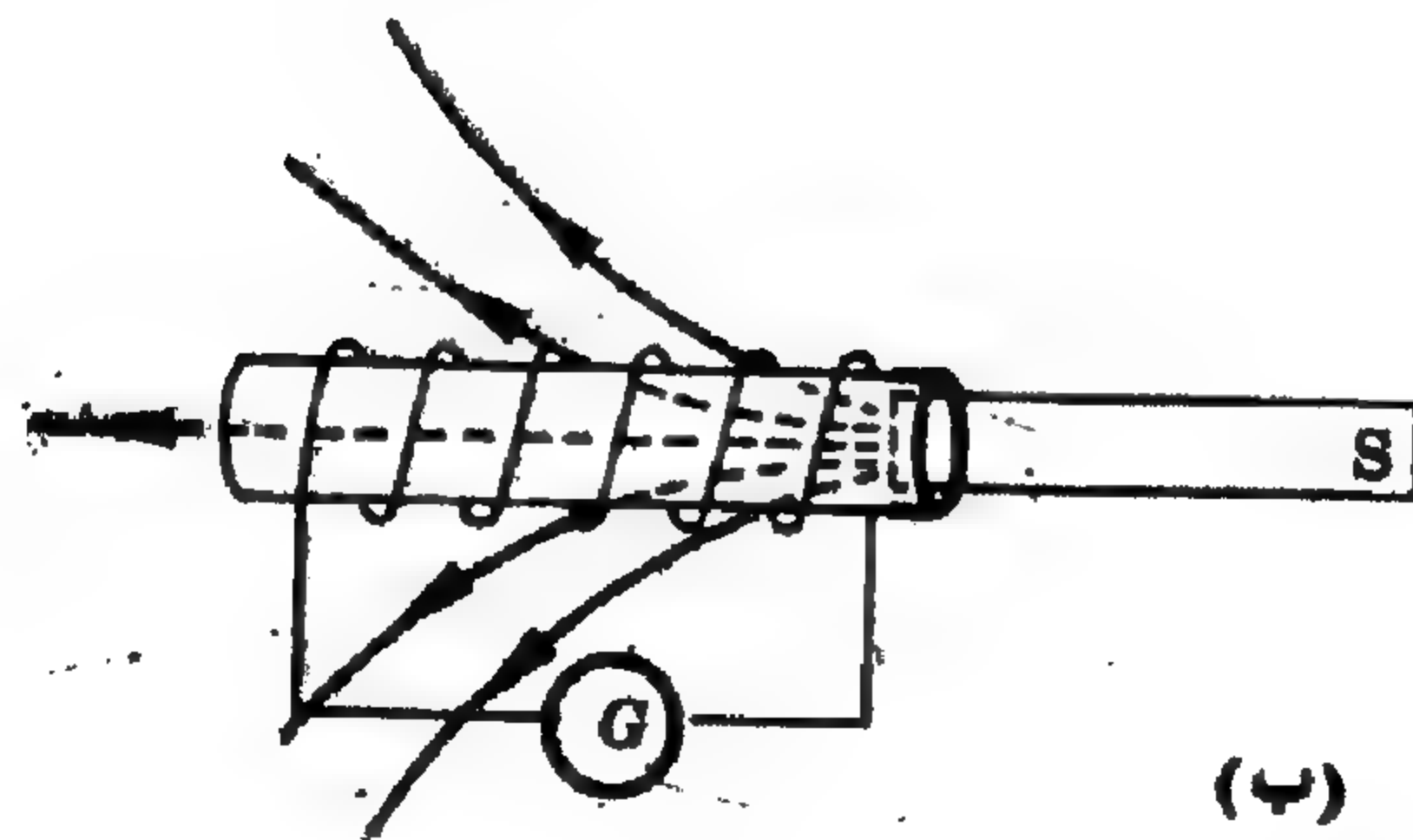
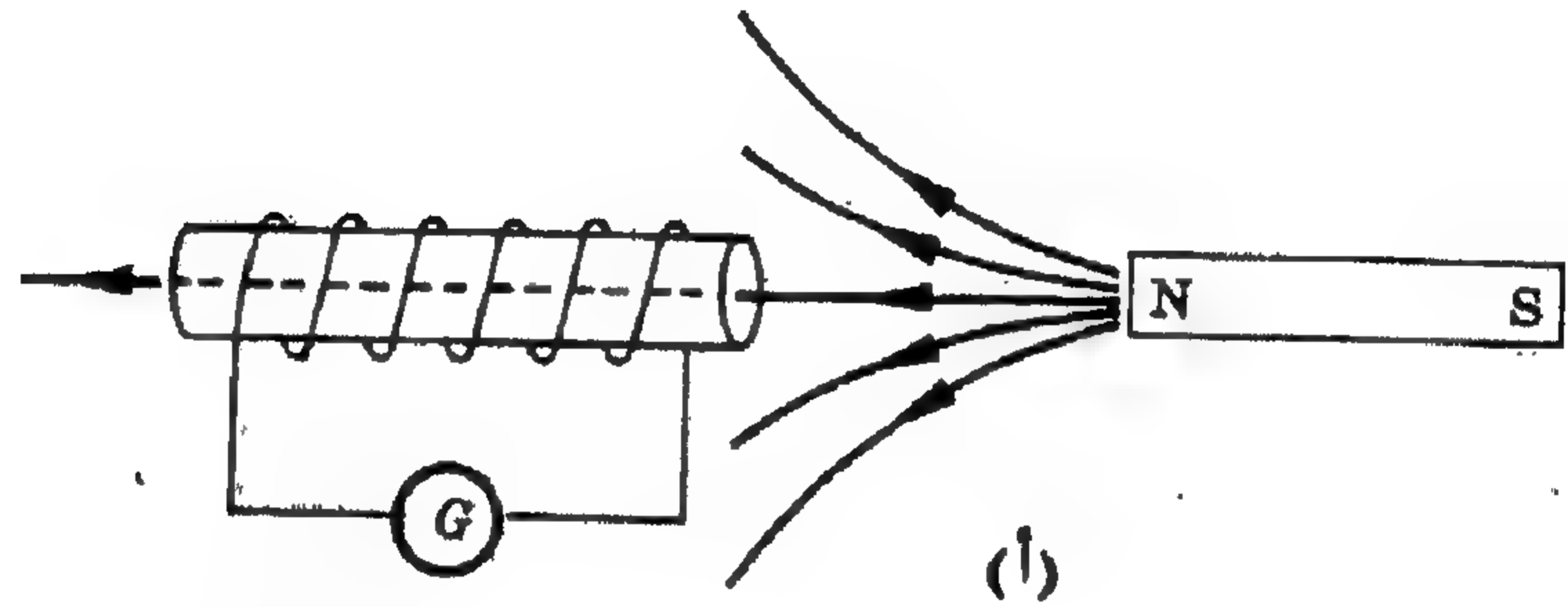
هناك تجربة ثانية مشابهة موضحة في الشكل ٢٠ - ٧ تتضمن هذه التجربة قضيبا مغناطيسيا وملقا متصلا على التوالي مع جلفانومتر . حين يكون المغناطيس ساكنا بجوار الملف ، كما في الجزئين (أ) ، (ح) من الشكل فلا يسرى تيار في الملف ، ولكن إذا حرك المغناطيس بالنسبة للملف فإن التيار يسرى في الملف كما تبين الأجزاء ب ، د ، هـ . كما نرى ، توجد ق . د . ك منتجة بالحث في الملف حين يكون المغناطيس والملف في حركة نسبية فقط ، وتختفي ق . د . ك المنتجة بالحث حين تتوقف الظروف عن التغير .



شكل ٢٠ - ٧
يظهر التيار المستحث في
الملف عندما يكون التدفق
مغناطيسيا متغيرا . لماذا يسرى
التيار في الاتجاهين ؟

لقد اكتشف مايكل فاراداي (١٧٩١ - ١٨٦٧) هذه الحقائق وقام بدراستها ، وقد استنتج أن ال . ق . د . ك . المنتجة بالحث تتواجد بالملف فقط عندما يكون التدفق خلال الملف متغيرا كما في الشكل ٢٠ - ٦ ح على سبيل المثال . حيث أن خطوط المجال تتبع القضيب الحديدي كما هو مبين لذا يمر تدفق كبير خلال الملف الثانوي حين يكون المفتاح مغلقا ، وحين يفتح المفتاح يتضاؤل هذا التدفق حتى يصل إلى الصفر . تتواجد ق . د . ك . منتجة بالحث أثناء الوقت الذي يحدث فيه تغير في التدفق ولا توجد أية ق . د . ك . حين لا يكون التدفق في حالة متغيرة .

إذا رجعنا إلى الشكل ٢٠ - ٨ فإننا نرى أن نفس الموقف موجود بالنسبة للملف والمغناطيس . فكما هو مبين هناك ، يتغير التدفق خلال الملف حين يتحرك المغناطيس إن قربا أو بعدا . تتواجد ق . د . ك . منتجة بالحث خلال الوقت الذي يكون فيه التدفق خلال الملف متغيرا . ولنبحث الآن هذا التأثير بشكل كمي .



شكل ٢٠ - ٨
حين يتحرك المغناطيس من
(أ) إلى (ب) فإن التيار يسري
في الملف في الاتجاه المبين في
ح . م . لماذا ؟

يمكننا معرفة اتجاه الـ Q . د . ك المنتجة بالحث وذلك بالرجوع إلى النتائج التجريبية في الأشكال ٢٠ - ٦ إلى ٢٠ - ٨ ، فالرجوع إلى شكل ٢٠ - ٨ مثلا ، يمكننا أن نتعلم كيفية التنبؤ باتجاه Q . د . ك . كما نرى في الجزء (أ) والجزء (ب) يتغير التدفق بطريقة معينة بحيث يزداد التدفق خلال الملف في اتجاه اليسار ، ولكن - كما هو مبين في الجزء (ج) ، يسبب التيار المستحث في الملف تدفقا في الاتجاه المضاد لهذا . ويكون اتجاه Q . د . ك المنتجة بالحث بحيث تؤدي إلى ظهور تيار يكون التدفق الناشئ عنه ميالا الى الغاء التغير في التدفق خلال الملف . ستلاحظ عند فحص الشكلين ٢٠ - ٦ ، ٢٠ - ٧ سلوكا مشابها . يكون اتجاه التيار المستحث بحيث يحاول أن يلغى تغير التدفق خلال الملف ، وقد تضمنت هذه القاعدة في قانون لنز الذي يمكن أن ينص كالآتي :

قانون لنز

يقوم تغير التدفق خلال عروة من السلك بحث Q . د . ك . في العروة ويكون اتجاه التيار الناشئ عن هذه الـ Q . د . ك المنتجة بالحث بحيث ان التدفق الذي يحدثه التيار يعمل على معادلة التغير الأصلي في التدفق خلال العروة* .

بطريقة أخرى ، لو أن التدفق خلال ملف كان متجها إلى اليسار وكان متزايدا فإن الـ Q . د . ك . المنتجة بالحث سيكون اتجاهها بحيث تنتج تدفقا خلال الملف يكون متجها إلى اليمين . ولو كان التدفق متجها إلى اليسار وكان متناقصا ، فإن Q . د . ك المنتجة بالحث ستحاول أن تنشئ تدفقا خلال الملف يتجه إلى اليسار . تتواجد Q . د . ك . المنتجة بالحث أثناء تغير التدفق فقط .

اكتشف فاراداي العلاقة الرياضية التي تحكم Q . د . ك المنتجة بالحث في الملف . إذا كان بالملف N عروة من السلك ، ولو تغير التدفق بكمية مقدارها $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ في زمن قدره Δt ، فإن متوسط Q . د . ك المنتجة بالحث خلال هذا الزمن يكون

$$Q \text{ . د . ك .} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad \text{قانون فاراداي}$$

تسمى هذه المعادلة قانون فاراداي . ليست الإشارة السالبة إلا إجراء شكليا وتذكرنا بأن Q . د . ك المنتجة بالحث تتجه بحيث تعاكس التغير في التدفق . مثال توضيحي ٢٠ - ٢ يحتوي ملف لولبي على 100 لفة من السلك ، وكانت مساحة مقطعة 4.0 cm^2 لو أن مغناطيسيا قرب بشكل مفاجيء من الملف فإن B

* يعتبر هذا نتيجة لحفظ الطاقة ، فلو أن التدفق المتولد بالتيار المستحث كان في اتجاه يبيح تراكم التغير في التدفق ، فإن التيار المستحث سيستمر في حث مزيد من التيار بلا نهاية .

تزايد من الصفر حتى 0.50 T في زمن 0.02s فكم تبلغ القيمة المتوسطة لـ ق . د .
ك المتولدة في الملف اللولبي ؟

طريقة الحل : نذكر أن $\phi = B_{\perp}A$ وعليه فإن

$$\phi_2 = (0.5)(4 \times 10^{-4}) = 2 \times 10^{-4} \text{ Wb} \quad \text{و} \quad \phi_1 = 0$$

وعندئذ يكون لدينا

$$\Delta\phi = 2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

ويؤدي قانون فاراداي إلى :

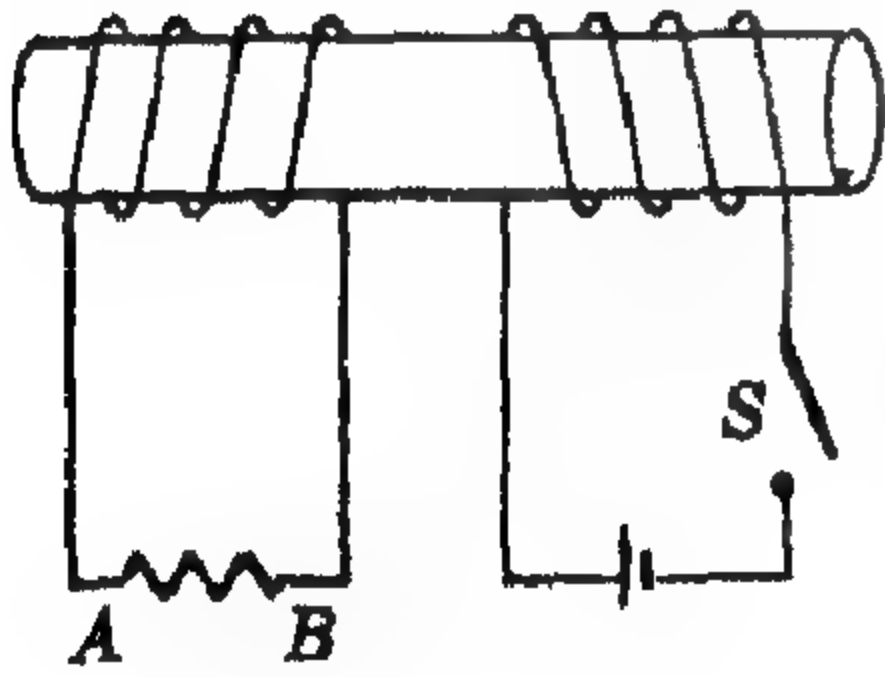
$$1.0 \text{ V} = (100) \left(\frac{2 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{2 \times 10^{-2} \text{ s}} \right) = \text{ق . د . ك}$$

يجب أن تكون قادرا على إثبات أنه لما كان Weber يساوي
newton-meter/ampere فإن وحدات الإجابة يجب أن تكون volts .

٢٠ - ٦ المحاكاة المتبادلة

شكل ٢٠ - ٩

لماذا يمر التيار من A إلى B
خلال المقاوم في نفس
اللحظة التي يفتح فيها
المفتاح ؟



ينطبق قانون فاراداي للقوى الدافعة الكهربائية المنتجة بالحث في ملف على أية طريقة
يتم فيها تغير التدفق خلال الملف . افترض أن لدينا ملفين موضوعين جنباً لجنب كما في
الشكل ٢٠ - ٩ . حين يفتح المفتاح S ، يكون التدفق صفراً خلال أي من الملفين .
لقد سبق وأن سمينا الملف الموجود في دائرة البطارية ابتدائياً والملف الآخر ثانوياً .

إذا أغلق المفتاح فجائياً ، فإن الملف الابتدائي سيتصرف كمغناطيس كهربائي
ويولد بهذا تدفقاً في المنطقة المتاخمة . يتغلغل بعض التدفق من الملف الابتدائي خلال
الملف الثانوي ، وعلى ذلك يتغير التدفق خلال الملف الثانوي إذا أغلق S فجأة .
وحسب قانون فاراداي تتولد ق . د . ك منتجة بالحث في الملف الثانوي في نفس
اللحظة التي يرتفع فيها التيار من الصفر حتى قيمته النهائية في الملف الابتدائي . عليك
أن تثبت أن اتجاه التيار المستحث خلال المقاوم في شكل ٢٠ - ٩ سيتجه من B إلى
A حينما يغلق S ويمر في الاتجاه المضاد حين يفتح المفتاح .

تعتمد قيمة ق . د . ك المنتجة بالحث في الثانوي على عوامل هندسية متعددة
ومن بينها عدد لفات السلك على كل من الملفين ، ومدى تقارب الملفين ومساحة
مقطعيهما وخلافه . (لماذا ؟) . علاوة على ذلك ، حيث أن التدفق خلال الثانوي
سيكون متناسباً مع التيار في الابتدائي ، فإن ق . د . ك المنتجة بالحث في الثانوي

ستتناسب مع معدل تغير التيار في الابتدائي ، $\Delta I_p / \Delta t$ ، ولهذا نكتب المعادلة التالية ، المعبرة عن ق . د . ك المنتجة بالحث في الثانوي .

الحالة المتبادلة

$$emf_{sec} = -M \frac{\Delta I_p}{\Delta t}$$

٢٠ - ٣

سبق أن أشرنا إلى أن ثابت التناسب M يتضمن تأثيرات هندسة الملفين . وهذا الثابت يسمى الحثية المتبادلة للملفين . إذا كانت ق . د . ك معبر عنها بوحدات volts والتيار amperes والزمن s . فإن وحدات M تكون حسب التعريف henry (H) أو V.s/A وقد سميت هذه الوحدة باسم أحد معاصري فاراداي وهو جوزيف هنري (١٧٩٧ - ١٨٧٨) الذي اكتشف ، فعليا كثيرا من النتائج التي نسبت إلى فاراداي ولكن لسوء الحظ فإن نتائج هنري التي حصل عليها أثناء وجوده في مدينة ألباني N.Y لم تنشر على نطاق واسع ولذا كان لها تأثير طفيف على التقدم العلمي في ذلك الوقت .

مثال توضيحي ٢٠ - ٣ ملفان من السلك الملفوف حول قلب حديدي ، لهما حثية متبادلة مقدارها 0.50 H ، ما هي القيمة المتوسطة لـ ق . د . ك التي تتولد في الثانوي عندما يزيد تيار الابتدائي من 2.0A إلى 3.0A في $\frac{1}{100}$ s ؟
طريقة الحل : نريد أن نشرح أولا إلى أنه عندما يلف ملفان حول قلب حديدي فإن التدفق يكون أكبر بكثير مما لو كانا قد لفا حول قلب غير مغناطيسي ، ومن ثم فقيمة M المعطاه هنا أكبر بكثير عما يمكن أن يوجد للملفات ذات القلب غير الحديدي . باستخدام المعادلة (٢٠ - ٣) فإننا نجد ، باستخدام وحدات SI المناسبة ،

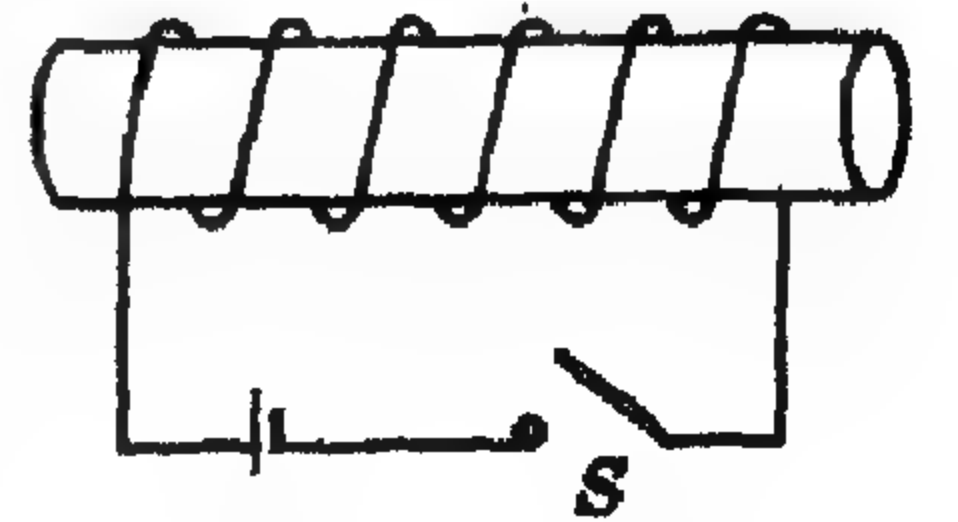
$$emf = (0.50) \left(\frac{1.0}{0.01} \right) = 50 \text{ V}$$

لاحظ أن ق . د . ك هذه ستوجد خلال لحظة فقط في الثانوي ، وبمجرد أن يصبح التيار في الابتدائي ثابتا فإن التدفق يتوقف عن التغير ولا يصبح هناك أي ق . د . ك منتجة بالحث .

٢٠ - ٧ الحثية الذاتية

لو أننا صدقنا قانون فاراداي ، فإننا بذلك نعلم أن أي تغير في التدفق خلال ملف ما سيحث ق . د . ك في ذلك الملف . ويعني هذا أنه عندما يتغير تيار خلال ملف ما فإن هذا الملف يحث ق . د . ك داخل نفسه ، وعلى هذا لو اعتبرنا الملف المرسوم في الشكل ٢٠ - ١٠ فإن التدفق يتغير فيه من الصفر وحتى قيمة محدودة حينما يغل المغناطيس أول مرة . سيتولد تدفق نتيجة للتيار وسيتمجه هذا

شكل ٢٠ - ١٠
حين يغل المغناطيس أولا فإن الملف سيحث ق . د . ك داخل نفسه . هل ستكون هذه الـ ق . د . ك مساعدة أو معاكسة للبطارية ؟



التدفق نحو اليسار خلال الملف . ستتولد حسب قانون فاراداي ق . د . ك منتجة بالحث في الملف وستحاول أن تنتج تدفقا متجها إلى اليمين خلال الملف . أى أن ق . د . ك المنتجة بالحث يجب أن تكون معاكسة لتلك الناشئة عن وجود البطارية . لو أن المفتاح فتح فجأة ، فإن ق . د . ك المنتجة بالحث ستكون في مساعدة - بدلا عن معاكسة - البطارية (هل يمكنك توضيح ذلك ؟) .

هنا أيضا ستحكم هندسة الملف ومادة القلب في تحديد قيمة ق . د . ك المنتجة بالحث - لو كان $\Delta I / \Delta t$ هو معدل تغير التيار خلال الملف ، فانا نستطيع كتابة المعادلة التالية لقيمة ق . د . ك المتوسطة والمنتجة بالحث .

$$\text{emf} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (20 - 4)$$

يسمى ثابت التناسب L المحاثية الذاتية للملف . وله نفس وحدات المحاثية المتبادلة أى المحاثية الذاتية هنري henry .

من الواضح ، أنه إذا كان الملف ملفوفا حول قلب حديدى ، فإن التدفق خلاله سيكون أكبر بكثير مما لو كان هناك مادة غير مغناطيسية ، ومن ثم ، إذا كنا نريد محاثية ذاتية كبيرة فإن ملف المحاثية يجب أن يكون ملفوفا حول قلب حديدى . سنعود إلى سلوك المحاثية الذاتية والمتبادلة في أقسام تالية حيث تظهر أهمية هذه الكميات في دوائر التيار المتردد (ac) ، حيث يتغير التيار وبالتالي التدفق بشكل مستمر .

٢٠ - ٨ ق . د . ك الحركية

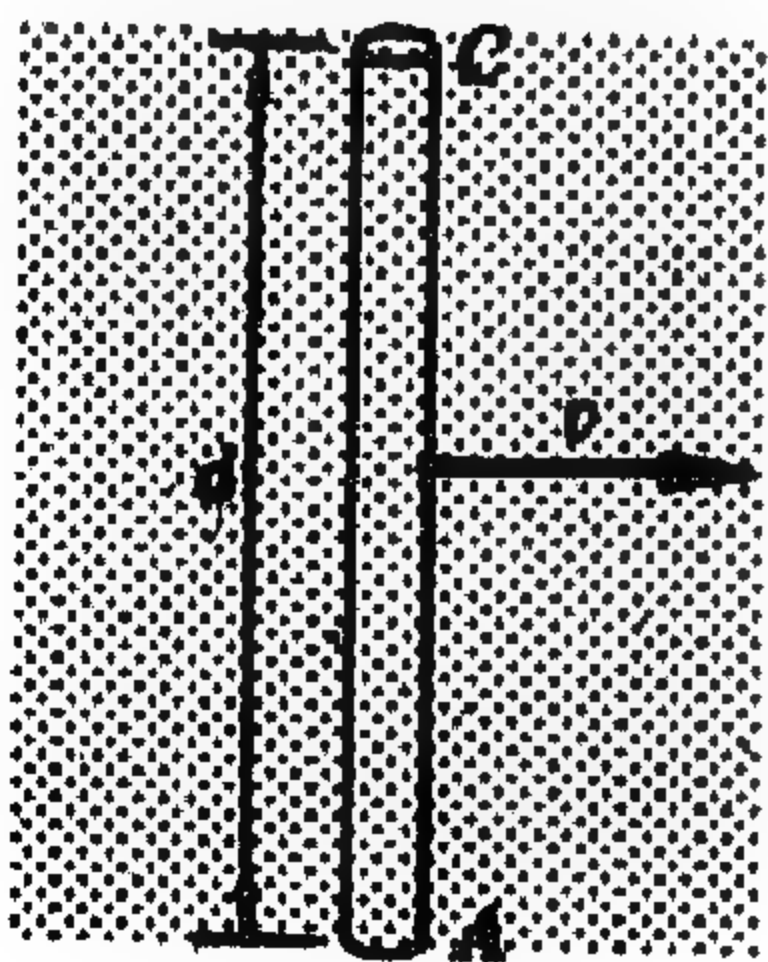
يمكن بسهولة - في بعض الحالات على الأقل - تفسير حث ق . د . ك في دائرة عن طريق تغير التدفق وذلك بطريقة أخرى . وتؤدي هذه الطريقة الثانية للمعالجة إلى مزيد من الفهم للعمليات التى تحدث . وأساس هذه الطريقة هو حقيقة أن الشحنة المتحركة تتعرض لقوة حين توجد في مجال مغناطيسى ، وقد تعلمنا أن القوة F المؤثرة على شحنة q متحركة بسرعة v عمودية على مجال مغناطيسى B_{\perp} تعطى بالمعادلة :

$$F = B_{\perp} q v \quad (20 - 5)$$

باعتبار هذه الحقيقة ، لتأمل حركة سلك طوله d في مجال مغناطيسى كما هو مبين في الشكل ٢٠ - ١١ . نذكر أن v في اتجاه حركة الشحنة وأن حركة هذه الشحنات هى في الحقيقة تيار فإن الشحنات الموجبة ستضطر أن تتجه إلى الطرف الأسفل للسلك ، ومن ثم يصير قاع السلك موجب الشحنة بينما تصبح قمته سالبة الشحنة . سيظهر مجال كهربي E بداخل السلك .

شكل ٢٠ - ١١
تعرض الالكترونات في السلك لقوة تتجه إلى قمة السلك عندما يتحرك السلك خلال المجال كما هو مبين .

B خارجة من الصفحة



إن E عرفت على أنها قوة لوحدة الشحنات أو F/q . عند الاتزان تكون قوة المجال الكهربائي المتجهة من قاع السلك إلى قمته بحيث توازن القوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنات الموجبة والتي تتجه من القمة إلى القاع . باستخدام المعادلة ٢٠ - ٥ نجد أن القوة المغناطيسية المؤثرة على وحدة الشحنات هي

$$\frac{F}{q} = B_{\perp} v$$

بينما القوة الكهربائية لوحدة الشحنات هي :

$$\frac{F}{q} = E$$

بمساواة هاتين المعادلتين نجد أن

$$E = B_{\perp} v \quad (٢٠ - ٦)$$

وبهذا نجد أن سلكاً متحركاً بسرعة ثابتة مقدارها v عمودية على مجال مغناطيسي B_{\perp} يقوم بإنشاء مجال كهربائي بداخله وهذا المجال يعطى بالمعادلة (٢٠ - ٦) وينتج عنه فرق للجهد بين طرفي السلك . بما أن فرق الجهد هو ببساطة الشغل المبذول في حمل وحدة الشحنات من C إلى A فإنه يصبح لدينا ،

$$q \cdot d \cdot K \text{ المستحثة بالحركة} \quad q \cdot d \cdot K \text{ المنتجة بالحث} = B_{\perp} v d = E d = V \quad (٢٠ - ٧)$$

من الممكن اشتقاق المعادلة (٢٠ - ٧) من قانون فاراداي أيضاً. ولعمل هذا يجب أن تكون لدينا دائرة يمكن بالنسبة لها كتابة المعادلة الآتية :

$$q \cdot d \cdot K \text{ المنتجة بالحث} = N \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

لتفرض أن السلك المتحرك في شكل ٢٠ - ١١ يتصل بواسطة ملامس منزلق مع دائرة ساكنة كما في الشكل ٢٠ - ١٢ . يتحرك السلك مسافة قدرها v في زمن Δt حتى يصل للوضع MN . نتيجة لهذا تزيد مساحة عروة التيار بمقدار $v \Delta t$ وهي المساحة المظللة في الشكل . نتيجة لهذا يكون التغير في التدفق خلال الدائرة ، وفي زمن قدره Δt هو .

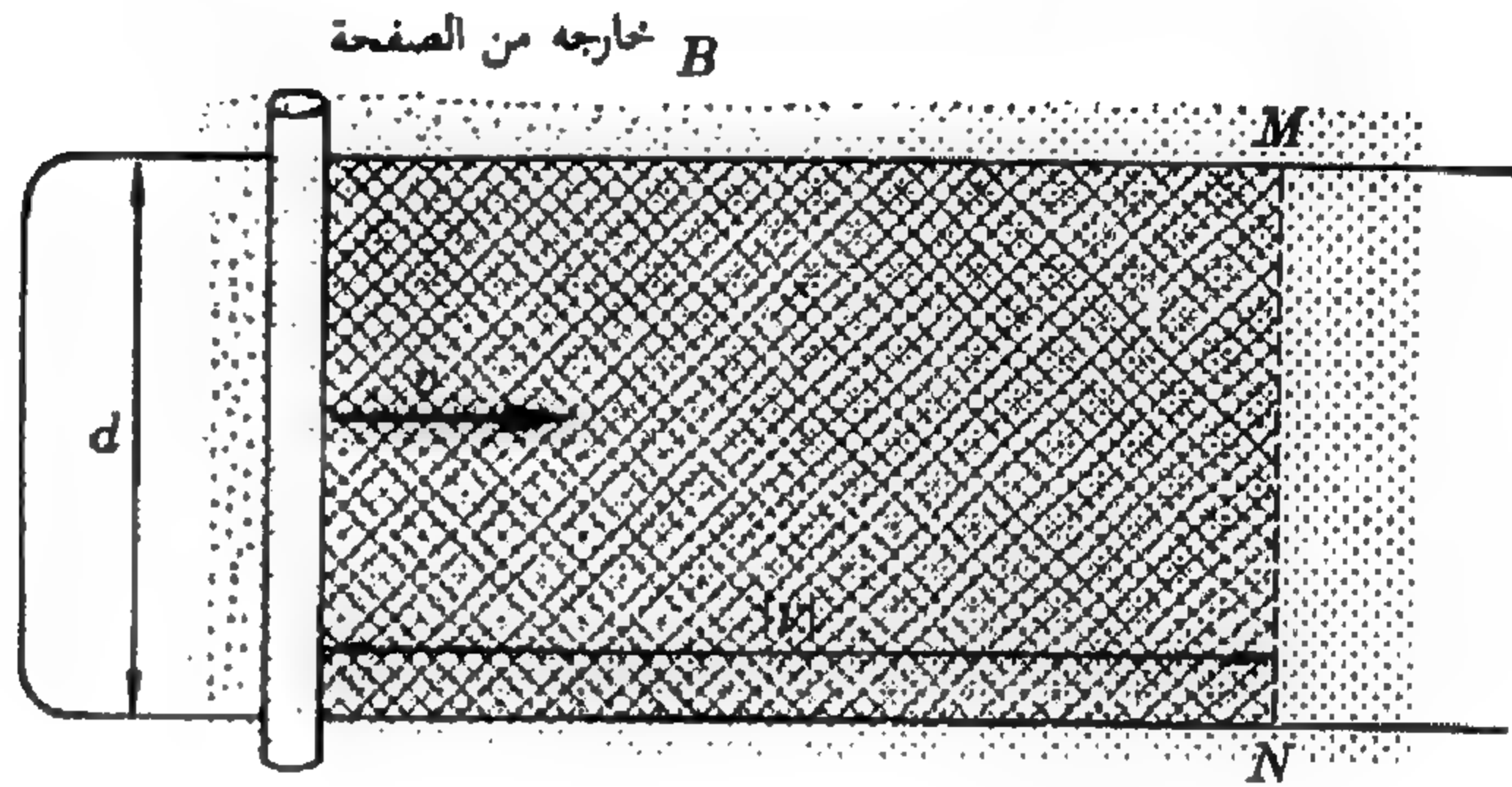
$$\Delta \phi = B_{\perp} \Delta A = B_{\perp} v \Delta t d$$

باستخدام قانون فاراداي للقوة الدافعة الكهربائية المنتجة بالحث في العروة نجد أن

$$B_{\perp} v d = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \text{ق . د . ك . المنتجه بالحث}$$

شكل ٢٠ - ١٢
يمكن اعتبار ق . د . ك .
المنتجه بالحث في السلك على
أنها نتيجة لتغير التدفق خلال
العروة .

وهذه هي بالضبط المعادلة (٢٠ - ٧) . من هنا يتضح أن ال . ق . د . ك .
المنتجة بالحث والمعطاة بقانون فاراداي هي بالفعل مستحثة بالكامل في السلك
المتحرك المستقيم من الدائرة ، ومن ثم يكون أصل ق . د . ك . المنتجه بالحث قد فهم
تماما بدلالة القوى المؤثرة على شحنات تتحرك خلال مجال مغناطيسي . ولسوء الحظ
ليست جميع المواقف بهذه البساطة وماعلينا إلا أن نعتبر حالة ملفي الحثاثة المتبادلة من
شكل ٢٠ - ٩ لكي ندرك أن المبادئ التي تحدثنا عنها ليست دائما واضحة .



عليك أن تعرف كيف يمكن تعديل المعادلة (٢٠ - ٧) في حالة ما إذا كانت
السرعة v ليست عمودية على السلك . وربما كان من الأسهل عمل هذا بالرجوع إلى
شكل ٢٠ - ١٢ . هل يمكنك إثبات أن d يجب أن يحل محلها مركبة d العمودية على
 v في هذه الحالة ؟

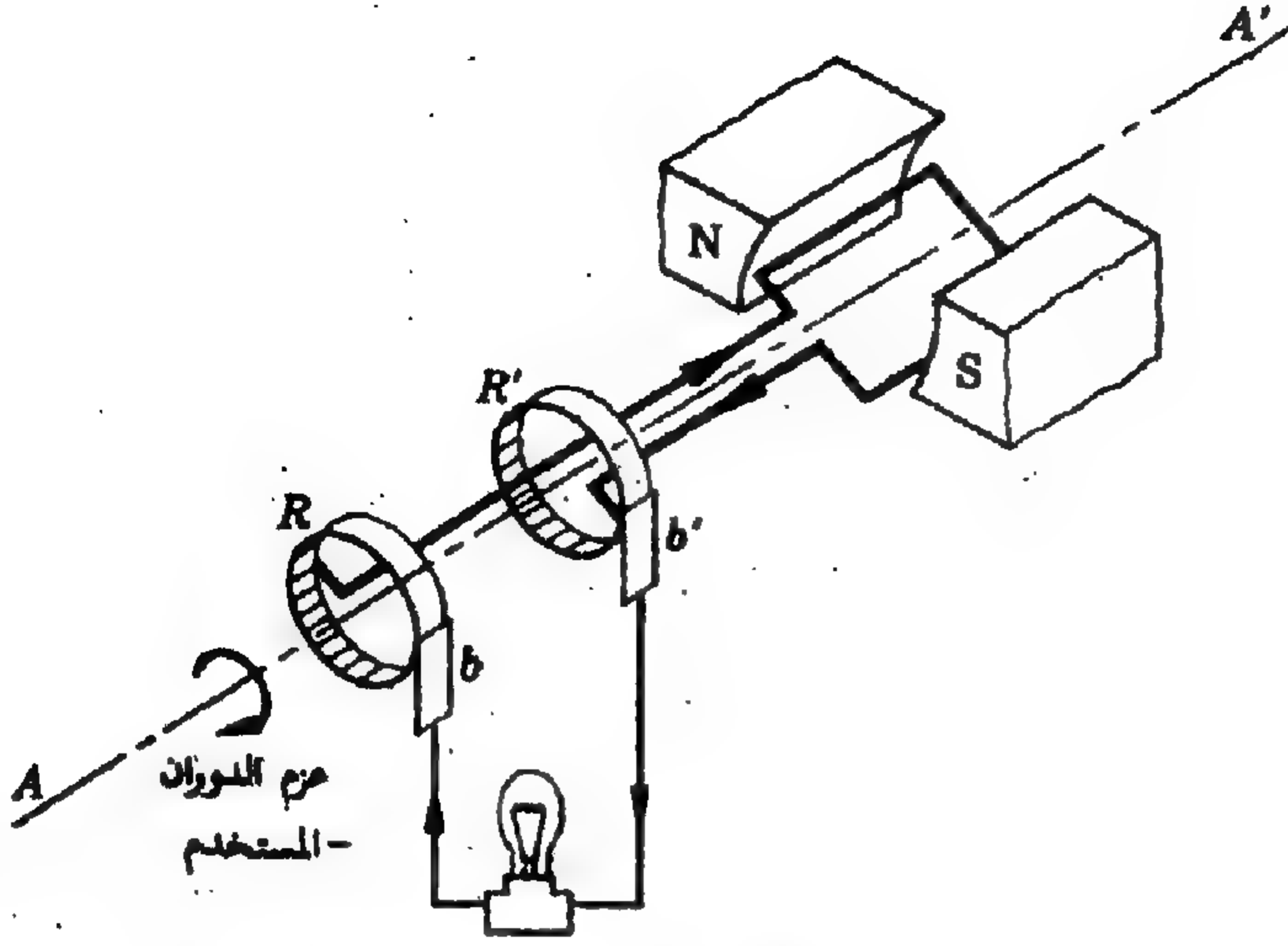
٢٠ - ٩ مولد التيار المتردد

يقوم المولد بإنتاج فرق للجهد بين طرفين عن طريق تغيير التدفق خلال
ملف . ويمكن تغيير التدفق ، نظريا ، إما بتحريك مغناطيس بالنسبة للملف واما
بتحريك الملف بالنسبة للمغناطيس والاختيار الثاني أسهل في التحقيق عمليا وهو
الذي يستخدم عادة .

يدور ملف السلك المبين في شكل ٢٠ - ١٣ حول المحور AA' . هناك مجال
مغناطيسي منتظم ومتعامد مع AA' يسببه قطب مغناطيسي كما هو مبين . لاحظ أن
أحد أطراف الملف متصل بحلقة انزلاق R والآخر متصل بالحلقة R' . تدور هاتان
الحلقتان مع الملف ويظل هناك تلامس مع الأطراف الثابتة بواسطة فرجونين b' و b
الذين ينزلقان على الحلقتين من الخارج .

شكل ٢٠ - ١٣

تتأق . د . ك معرودة بين
الطرفين $b'b'$ عندما يدور
الملف ل مجال مغناطيسي
خارجي .

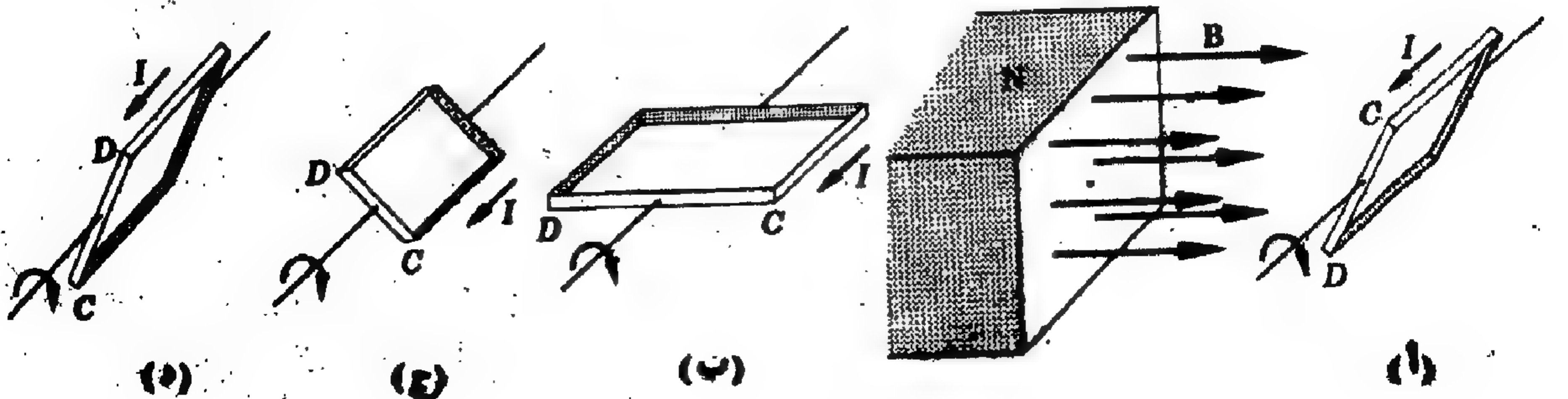


لنرجع إلى الشكل ٢٠ - ١٤ حتى نرى كيف تتولد بالضبط ق . د . ك متجة
بالحث بين طرفي الملف الذي يفترض أنه يدور في اتجاه عقارب الساعة . ولإيجاد اتجاه
سريان التيار نستخدم قانون لنز .

بعضاءل عدد خطوط التدفق خلال الملف كلما دار الملف من الوضع المبين في
الشكل ٢٠ - ١٤ ، ولهذا تقوم ق . د . ك المتجة بالحث بدفع تيار في الاتجاه المبين
حتى تزيد من التدفق ، أى لتوازن التغير . عليك أن تفحص كل جزء من الشكل
٢٠ - ١٤ وأن تكون قادرا على أن تشرح بوضوح لماذا يسرى التيار في الاتجاه المبين .
لاحظ أن الجزء (د) هو بالضبط الجزء (أ) فيما عدا أن الملف قد دار . ولكن ق .
د . ك المتولدة في الملف قد عكست اتجاهها في الذهاب من ح إلى د ، أى أن التيار
في الملف يعكس اتجاهه في كل مرة يكون فيها الملف عموديا على المجال .

يمكن الحصول على تعبير يعطى ق . د . ك في الملف وذلك باعتبار إما معدل
تغير التدفق خلال الملف أو حركة الأسلاك خلال المجال المغناطيسي . في حالة القدرة
على استعمال التفاضل والتكامل فإن طريقة التدفق تكون أكثر ملاءمة ، ولكننا
سنستخدم الطريقة الأخرى لأنها لا تحتاج إلى استعمال التفاضل والتكامل .

شكل ٢٠ - ١٤
عندما تدور العروة في المجال
المغناطيسي الخارجي ، فإن
اتجاه التيار المستحث يعكس
فيما بين الوضعين المبينين في
(د) ، (ح) .



توصلنا في القسم السابق إلى أن ق . د . ك المنتجة بالحث في سلك هي Bvd ، حيث وجدنا أن الكميات الثلاث d, v, B يجب أن تكون متعامدة على بعضها البعض . فإذا لم تكن متعامدة لزم أن نأخذ مركباتها العمودية . تدور العروة المستطيلة التي تحوي N لفة وأبعادها b في a (حيث a هو البعد عموديا على الصفحة) في اتجاه عقارب الساعة كما في الشكل ٢٠ - ١٥ ، القوتان الدافعتان الكهربائيتان المنتجتان بالحث في جانبي العروة الموازيين للصفحة في الجزء (ب) تساويان صفرا . ولذلك سنهتم فقط بالقوة الدافعة الكهربائية المنتجة بالحث في أسلاك العروة التي تتعامد مع الصفحة .

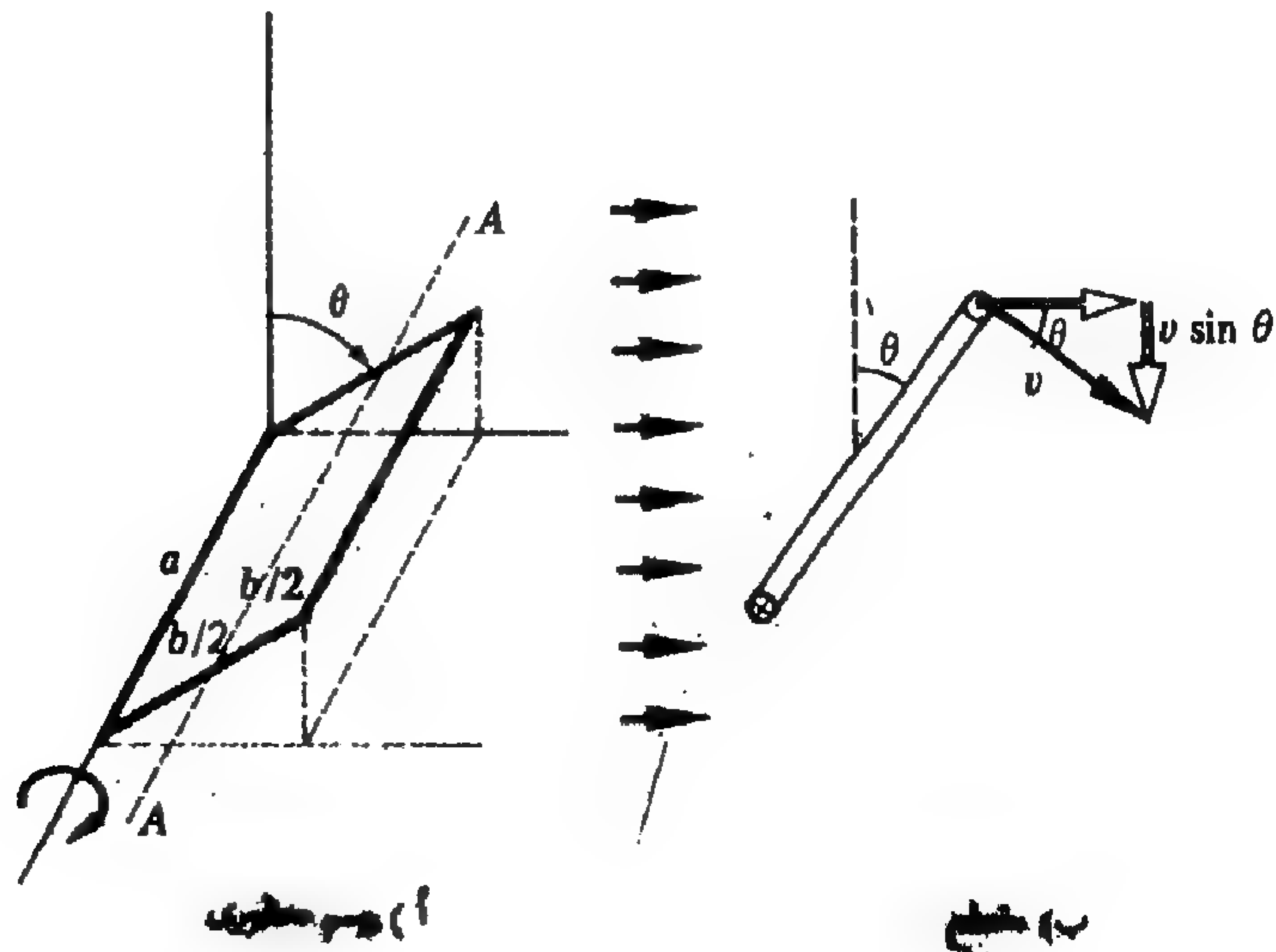
اعتبر الآن أسلاك العروة التي تتعامد مع الصفحة عند قمة الشكل ٢٠ - ١٥ ب ، ق . د . ك المنتجة بالحث في كل من الأسلاك ستحاول أن تدفع بالتيار إلى خارج الصفحة ، ولما كانت B والسلك متعامدين فعلا لذا فإننا نحتاج أن نضرب في مركبة v العمودية فقط ، $v \sin \theta$ حتى نحصل على ق . د . ك وهذا تكون ق . د . ك المنتجة بالحث في كل من أسلاك قمة الملف هي :

$$B(v \sin \theta)a$$

من الواضح أن كل أسلاك القمة ستقوم بحث تيار يسري في نفس الاتجاه ولذا فإن آثارهم ستجمع مع بعضها . علاوة على ذلك ، فإن الأسلاك السفلى للعروة وعددها N ستحاول أن تسبب تيارا يسري في اتجاه مشابه حول العروة . نتيجة لهذا تكون ق . د . ك الكلية المنتجة بالحث أكبر $2N$ مرة من القيمة المذكورة في التعبير السابق ، وعلى هذا نجد أن

$$ق . د . ك المنتجة بالحث = 2NBav \sin \theta \quad (٢٠ - ٨)$$

شكل ٢٠ - ١٥
ق . د . ك المنتجة بالحث في
العروة المستطيلة سببها السرعة
 $q \sin \theta$ للأسلاك عموديا
على الصفحة



من الأمور الأكثر شيوعاً ، التعبير عن هذه المعادلة بدلالة السرعة الدورانية ω فنحن نعلم من $v_r = \omega r$ أن $v = \frac{1}{2} b \omega$ ، وحيث أن $\theta = \omega t$ since فإن لدينا .

$$NB\omega ab \sin \omega t = \text{ق . د . ك}$$

ولما كانت ab هي مساحة العروة A فإن هذا يكافئ :

$$NB A \omega \sin \omega t = \text{ق . د . ك} \quad (٢٠ - ٩)$$

المعادلة (٢٠ - ٩) قابلة للتطبيق على أية عروة مسطحة من السلك بغض النظر إذا كانت مستطيلة أم لا . لاحظ أن ω معبر عنها بوحدات radians لكل second ولو أردنا أن نجعلها دورة لكل ثانية rotations/second للزم أن نستفيد من العلاقة $\omega = 2\pi f$

ق . د . ك المنتجة
بالحث في ملف يدور

لو أنك رجعت إلى مادرسنا عن الأنظمة المهتزة لرأيت أن المعادلة (٢٠ - ٩) شبيهة بالمعادلة :

$$y = y_0 \sin \omega t = y_0 \sin 2\pi f t$$

التي استخدمت هناك . لقد مثلت هذه المعادلة إزاحة كتلة تهتز عند طرف زنبرك أو أداة مشابهة ، كما تفيدنا هذه العلاقة بأن موضع الكتلة قد اهتز جيئة وذهاباً في حركة جيبية بين $+y_0$ ، $-y_0$ - والكمية y_0 هي سعة الاهتزازة ، أما f فكانت عدد الاهتزازات في الثانية .

والآن يتضح أن المعادلة ٢٠ - ٩ تنص على أن فرق الجهد بين طرفي ملف يدور يكون متذبذباً جيئة وذهاباً ، وفي هذه الحالة تنعكس قطبية الأطراف بشكل تذبذبي . لو كان أحد الأطراف موجبا في البداية بالنسبة للآخر فسرعان ماتنعكس القطبية بحيث يصبح هو الطرف السالب . والرسم البياني للعلاقة بين فرق الجهد بين الطرفين كدالة في الزمن يكون على شكل منحني جيبى كالمبين في الشكل ٢٠ - ١٦ . وتشير القيم السالبة إلى مجرد أن ق . د . ك المنتجة بالحث في الملف قد عكست اتجاهها .

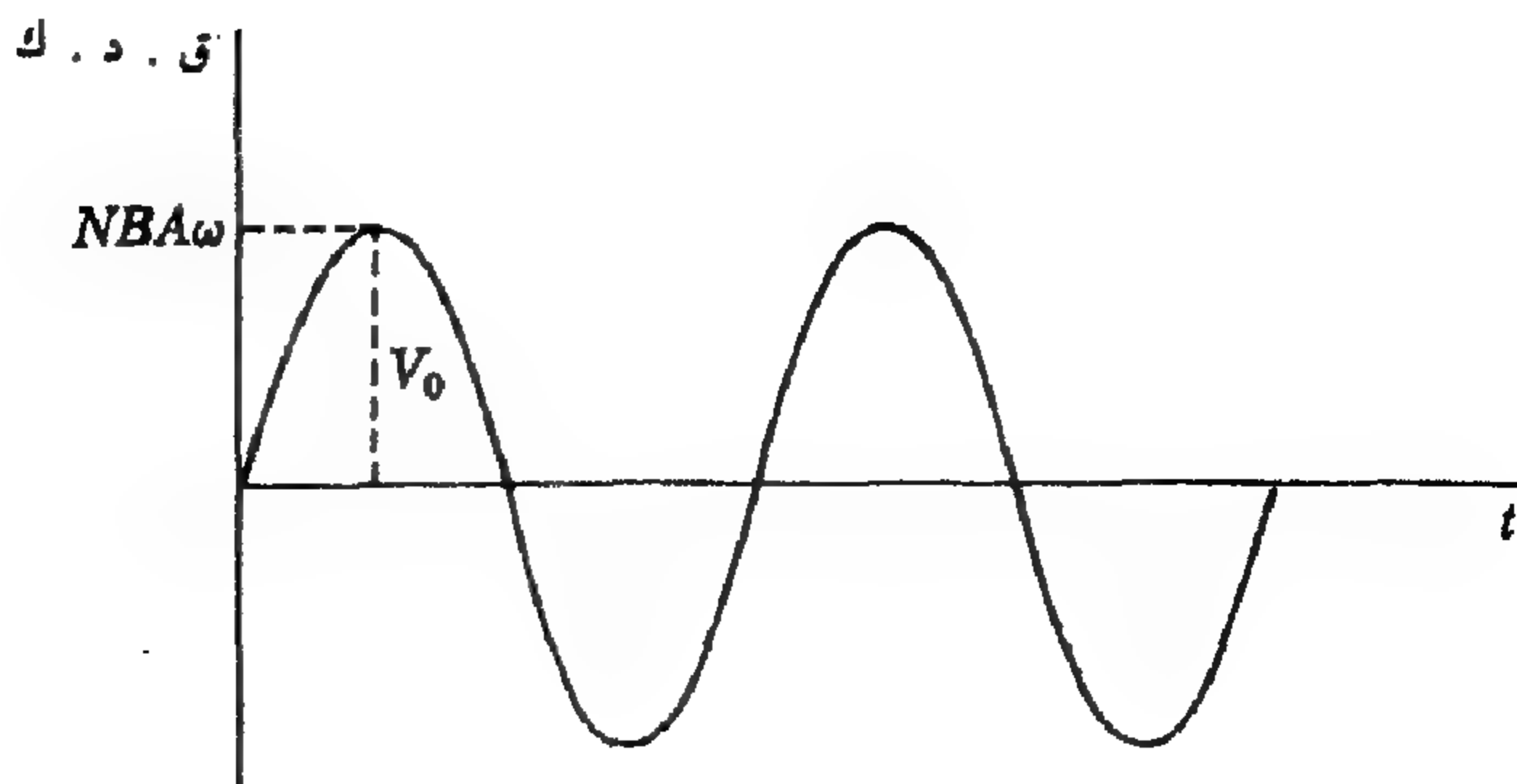
بمقارنة معادلة التذبذب مع المعادلة (٢٠ - ٩) نجد أن سعة الاهتزازة y_0 هي بالضبط $NBA\omega$ في هذه الحالة وهذه القيمة مبيّنة في شكل ٢٠ - ١٦ . وإذا ما سمينا هذه السعة V_0 فإن المعادلة (٢٠ - ٩) تصبح :

$$(٢٠ - ١٠)$$

$$v = V_0 \sin 2\pi f t$$

جهد متردد

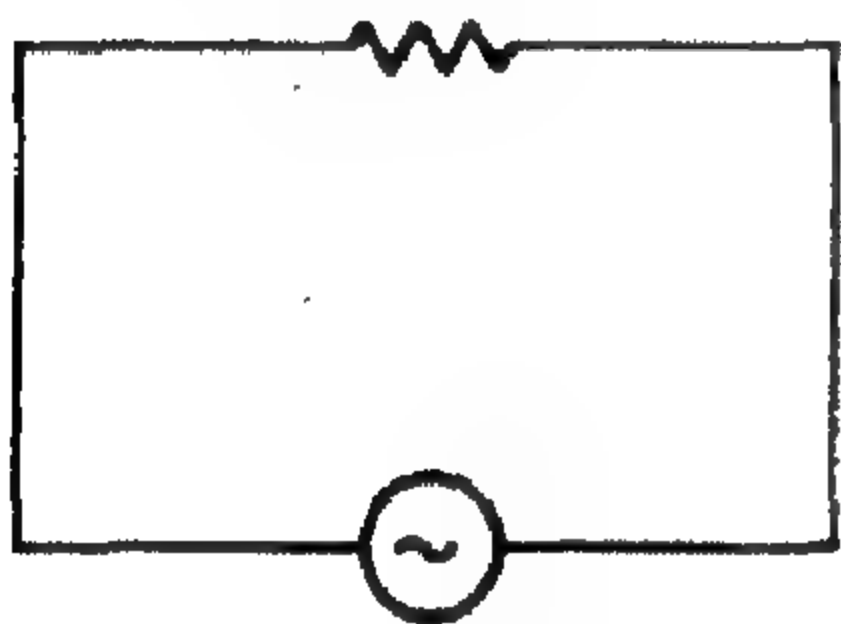
شكل ٢٠ - ١٦
تستحث ق . د . ك متردده
في مجال مغناطيسي منتظم



وهي تشير بوضوح كاف إلى أن فرق الجهد بين الأطراف يتردد جيبيًا .

من الاعتبارات السابقة نجد أن الحقيقة أصبحت واضحة على أن الملف السلبي الذي يدور في مجال مغناطيسي تولد عند طرفيه ق . د . ك مترددة . لو استخدم مثل هذا المولد كمصدر للقدرة في الدائرة البسيطة الموضحة في شكل ٢٠ - ١٧ فإن التيار المار خلال المقاوم سيعكس اتجاهه $2f$ مرة في الثانية . (لاحظ أن رمز مولد الجهد المتردد هو \sim) .

شكل ٢٠ - ١٧
دائرة تيار متردد بسيطة



ومولدات التيار المتردد التي تستخدمها شركات القوى الكهربائية عادة ماتكون أكثر تعقيدا من المولد الذي نناقشه هنا على الرغم من أن أساس عملها هو نفسه . تستخدم التربينات البخارية أو القوى المائية لتوفير الطاقة الميكانيكية اللازمة لإدارة الملف . ولنحاول أن ندرس بإيجاز عملية تحويل الطاقة في نظام كالين في شكل ٢٠ - ١٧ .

لو أن الدائرة كانت مفتوحة بحيث لا يمر تيار في ملف المولد فإننا نحتاج إلى قوة ضئيلة جدا لإدارة الملف . ولكن أن يسحب التيار من المولد (الملف) فإن المجال المغناطيسي سيؤثر بقوة على أسلاك المولد التي تحمل التيار وتكون هذه القوة في اتجاه معين بحيث توقف الملف عن الدوران . ومن ثم فالطاقة الميكانيكية التي تغذي المولد تعتمد على التيار المسحوب من المولد أي أن مزيدا من التيار يستلزم مزيدا من الطاقة الميكانيكية .

العلاقة بين الطاقة الكهربائية
والميكانيكية

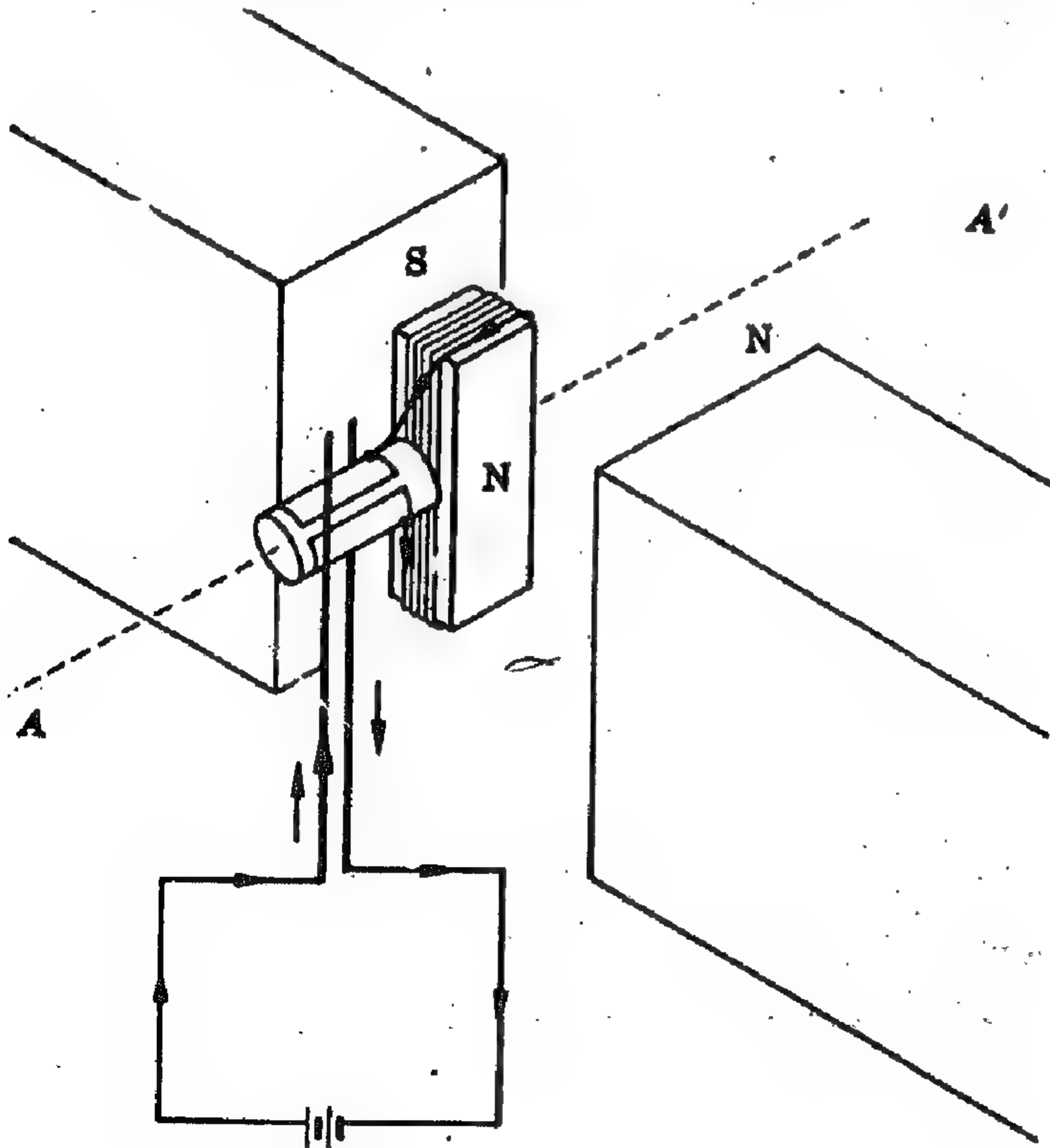
في لحظة ما عندما يكون جهد المولد V ، فإن القدرة التي تعطى للمقاوم في شكل ٢٠ - ١٧ تكون VI . من الواضح أنه لو كان I صغيرا جدا فإن القدرة المستهلكة في المقاوم تكون صغيرة وكذلك تكون الطاقة الميكانيكية اللازمة لتشغيل المولد صغيرة ، وعلى هذا نرى أن الطاقة اللازمة لتشغيل المولد تعتمد مباشرة على الطاقة التي تسحب منه .

وتتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية بواسطة التفاعل بين المجال المغناطيسي وحركة الشحنات داخل ملف المولد .

٢٠ - ١٠ المحركات

المحرك هو أساساً مولد يعمل في اتجاه عكسي . فكما في المولد ، يتكون المحرك من ملف يدور في مجال ناشئ عن مغناطيس . يوضح الشكل المبسط ٢٠ - ١٨ الملف الذي يوضع بين قطبي المغناطيس . من الناحية العملية قد يكون هذا المغناطيس ، مغناطيساً كهربائياً بدلاً من مغناطيس دائم . أما الملف نفسه فيلف حول قلب من الحديد الرخو حتى يزيد من المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار فيه . ويعمل الملف الحامل للتيار مثل قضيب مغناطيسي كما درسنا من قبل ، وتزداد شدته أكثر من مائة مرة باستخدام القلب الحديدي .

يتنافر القطب الشمالي للملف مع القطب الشمالي للمغناطيس الدائم كما في شكل ٢٠ - ١٨ . ولو أعطى الملف دورانا طفيفا في اتجاه ضد حركة عقارب الساعة (عندما ننظر على طول AA' من A إلى A') ، فإن الملف سيدفع للدوران نتيجة للتنافر المتبادل بين الأقطاب . عندما يدور الملف 180° فإن القطب الشمالي للملف يصبح قريبا من القطب الجنوبي للمغناطيس الدائم وقد يعوقه هذا عن الدوران بعيدا



شكل ٢٠ - ١٨
محرك تيار مستمر بسيط .
باعتبار حلقة الانزلاق
المبينة ، في أى اتجاه يدور
المحرك ؟

عن هذا الوضع ، ولكن عندما يصل الملف إلى ذلك الوضع فإن الملامسات المنزلة على حلقة الانزلاق المشقوقة تنزلق فوق الفجوة فينعكس التيار المار خلال الملف ، ويؤدي هذا إلى انعكاس قطبي الملف ومرة أخرى يتحقق الموقف المبدئي في الشكل ٢٠ - ١٨ ، فالتناظر محفوظ ونتيجة لهذا يستمر الدوران .

هناك صور مختلفة لمثل هذا المحرك . تتكون معظم المحركات من العديد من العرى الملفوفة بحيث تكون مستوياتها خلال AA' ويكون بين بعضها البعض زوايا مختلفة . يمر التيار في كل عروة خلال كسر طفيف من دورة وذلك في الوقت الذي يكون اتجاه العروة بالنسبة للمجال بحيث تحصل على أقصى عزم دوران ممكن . ومثل هذا المحرك يعطى عزمًا أكثر انتظامًا بكثير مما يمكن الحصول عليه من عروة واحدة .

تستعمل بعض المحركات مغناطيسات كهربائية بينما يستعمل البعض الآخر مغناطيسات دائمة للحصول على المجال المغناطيسي . تختلف الطريقة الصحيحة التي توصل بها ملفات المغناطيس والملف الذي يدور (أو عضو الانتاج) من محرك لآخر ، فبعض المحركات يعمل بكل من جهود التيار المستمر والتيار المتردد بينما يعمل البعض الآخر إما بأحدهما أو بالآخر فقط . يمكن للطلاب الاطلاع على مراجع أخرى لمزيد من الوصف المتكامل لهذه الأجهزة .

وقبل أن نترك موضوع المحركات سنشير إلى أن التيار المار خلال المحرك يتم التحكم فيه أساسًا عن طريق ق . د . ك المضادة وهي ق . د . ك منتجة بالحث وستناقشها فيما يلي (تكون مقاومة المحرك الجيد صغيرة جدًا عادة) . عندما يدور الملف (أو عضو الانتاج) في مجال المغناطيس الدائم فإن ق . د . ك تستحث فيه . وتكون ق . د . ك المنتجة بالحث ذات اتجاه بحيث تعاكس ق . د . ك التي تبعث بالتيار خلال الملف ، ولهذا السبب سميت ق . د . ك . خلفية أو مضادة ، ولما كانت مقاومة المحرك صغيرة عادة فإن مايجد من قيمة التيار خلاله هو هذه الق . د . ك المضادة . إذا كان المحرك قد حمل فوق طاقته فإنه يبطيء وعندئذ يقوم بسحب تيار أكبر من المنبع (لماذا ؟) وهذا التيار المتزايد الذي يسرى خلال المحرك فوق طاقته يصير في لحظة ما كبيرًا بدرجة تكفي لاحتراق المحرك .

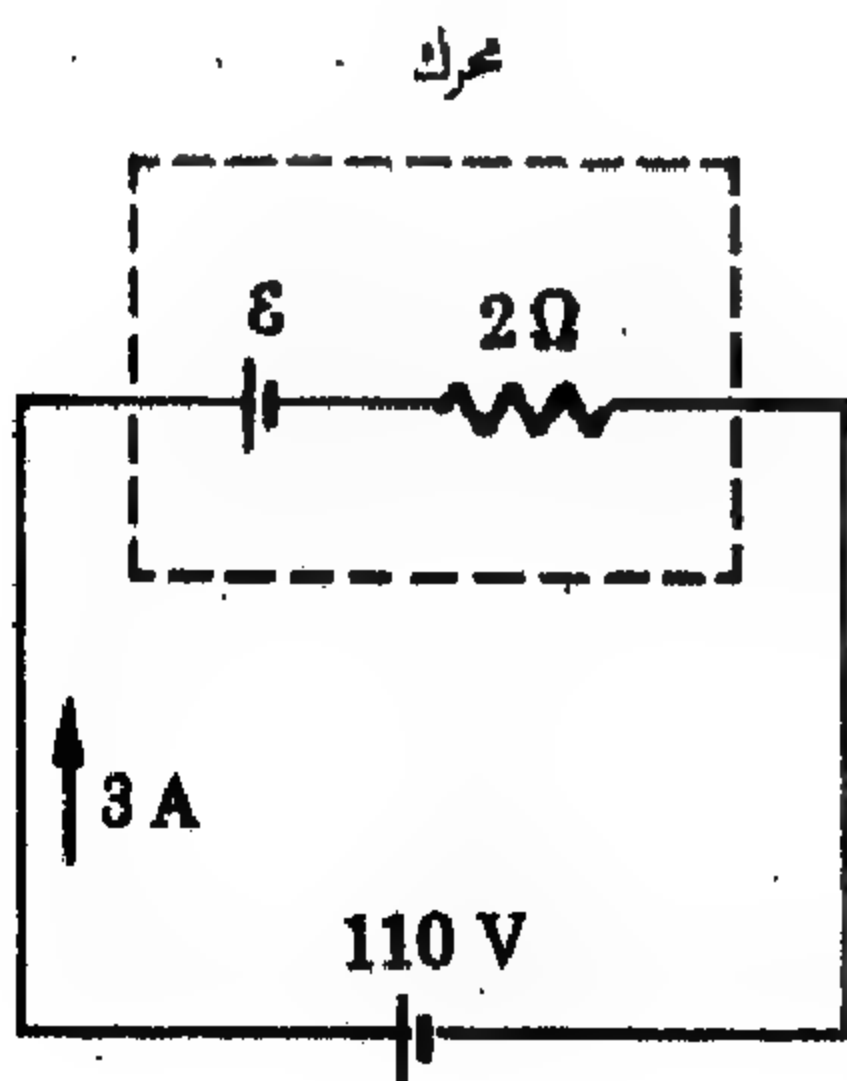
مثال توضيحي ٢٠ - ٤ محرك خاص له مقاومة قدرها 2.0Ω وحين يعمل بشكل طبيعي من خط $110V$ فإنه يسحب تيارا قدره $3.0A$. ماهي قيمة ق . د . ك المضادة التي يولدها ؟

طريقة الحل : يمكن تصور المحرك كما لو كان بطارية متصلة على التوالي مع مقاومة . وحيث أن البطارية ستمثل ق . د . ك المضادة لذا فهي تعاكس مصدر القدرة الذي يشغل المحرك . والموقف بأكمله مبين في شكل ٢٠ - ١٩ . بتجميع البطاريات وتطبيق قانون أوم نجد أن .

ق . د . ك المضادة
(أو الخلفية)

شكل ٢٠ - ١٩

يمكن تمثيل المحرك كما لو كان
مقاومة متصلة على التوالي مع ق . د . ك مضادة \mathcal{E}



$$110 \text{ V} - \mathcal{E} = (3 \text{ A})(2 \Omega)$$

$$\mathcal{E} = 104 \text{ V}$$

ملخص

حين يوضع ملف يحمل تياراً في مجال مغناطيسي B فإنه يتعرض لعزم لى . تبلغ قيمة عزم اللى المؤثر على ملف مسطح يحتوى على N عروة ومساحته A المقدار $ANIB \sin \theta$ حيث θ هي الزاوية بين B والعمود المقام على المساحة . تبلغ قيمة العزم المغناطيسي لعروة تيار I $\mu = IA$ وهذا العزم متجه وله اتجاه يعطى بقاعدة اليد اليمنى المعدلة . يميل المجال المغناطيسي إلى جعل متجه العزم المغناطيسي يتخذ اتجاه خطوط المجال . تستخدم في الأميترات والفولتميترات حركة الجلفانومتر ، التي تتكون من ملف موجود في مجال مغناطيسي . يدور الملف بحيث يكون الدوران متناسباً مع التيار المار خلاله . تحتوى الأميترات على مقاومة مجزئة ضئيلة متصلة على التوازي مع الحركة ، أما الفولتميترات فتحتوى على مقاومة عالية متصلة على التوالي مع الحركة .

حين يتغير التدفق خلال الملف فإن ق . د . ك تستحث في الملف ، ويكون مقدارها $N(d\phi/dt)$ حيث N هو عدد العرى بالملف ، وتسمى هذه المعادلة قانون فاراداي . أما اتجاه التيار الناشئ عن ق . د . ك فيعطى بقانون لنز . تكون ق . د . ك المنتجة بالحث في اتجاه معين بحيث أن التدفق الناشئ عن التيار يميل إلى موازنة التغير الأصلي في التدفق خلال العروة .

إذا تغير التيار في أحد الملفات بمعدل dI/dt فإنه يستحث ق . د . ك في ملف آخر مجاور ، وتعرف المحاثة المتبادلة للملين بالمعادلة ق . د . ك $-M(dI/dt) =$

حين يتغير التيار في ملف ما ، فإن ق . د . ك تستحث في نفس الملف ، وتعطى ق . د . ك المستحثة ذاتياً بالمعادلة ق . د . ك $-L(dI/dt) =$ حيث L هي المحاثة الذاتية للملف . تقاس كل من L, M بوحدات الهنرى (henry (H) .

حين يتحرك سلك طوله d بسرعة v عمودياً على مجال مغناطيسي B فإن ق . د . ك المنتجة بالحث تساوى $B \perp v d$ وتظهر بين طرفي السلك . وكلما قام السلك بقطع خطوط المجال المغناطيسي فإن ق . د . ك منتجة بالحث تظهر فيه .

يتكون مولد عادي للجهد المتردد من ملف واحد على الأقل يدور في مجال مغناطيسي . يقوم التدفق المتغير خلال الملف بإنتاج ق . د . ك جيئية بالحث داخل الملف . إذا كان الملف يدور بتردد مقداره f ، فإن ق . د . ك المنتجة بالحث تعطى بالمعادلة $V = V_0 \sin(2\pi ft)$

حيث أن المحركات تتكون من ملف يتحرك في مجال مغناطيسي ، لذا فهي تحتوى على ق . د . ك منتجة بالحث في الملف ، وتكون هذه عبارة عن ق . د . ك خلفية من شأنها معاكسة منبع الجهد الذي يدير المحرك . تحت ظروف التشغيل الطبيعية ، يكون التيار خلال المحرك محدوداً في أغلب الأحوال بهذه الق . د . ك الخلفية .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند إتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادراً على عمل الآتى :

- ١ - أن تشرح السمات الرئيسية لحركة جهاز القياس . وأن تذكر كيف تستعمل في صنع أميتر أو فولتميتر .
- ٢ - أن تحسب المقاومة المجزئة المطلوبة لجعل حركة معينة تلائم أميترًا ذا مدى محدد .
- ٣ - أن تحسب المقاومة المتصلة على التوالي ، والمطلوبة لجعل حركة معينة تلائم فولميترًا ذا مدى محدد .
- ٤ - أن تذكر في أى اتجاه يدور ملف يحمل تياراً حين يوضع في موقع معين في مجال مغناطيسي . وأن تحسب عزم اللى المؤثر على الملف حين تتوفر لديك البيانات .
- ٥ - أن تشير إلى موقع القطب الشمالى والجنوبى الفعالين بالنسبة لعروة تحمل تياراً أن تشرح ما المقصود بمتجه العزم المغناطيسي لعروة تيار .
- ٦ - أن تعطى اتجاه ق . د . ك المنتجة بالحث في ملف نتيجة لتغير تيار مجاور أو لمغناطيس متحرك وأن تصف بطريقة كيفية سلوك ق . د . ك كدالة في الزمن في تجربة بسيطة تتضمن دائرة مجاورة أو مغناطيس وتربط إجاباتك بقانونى لنز وفاراداي .

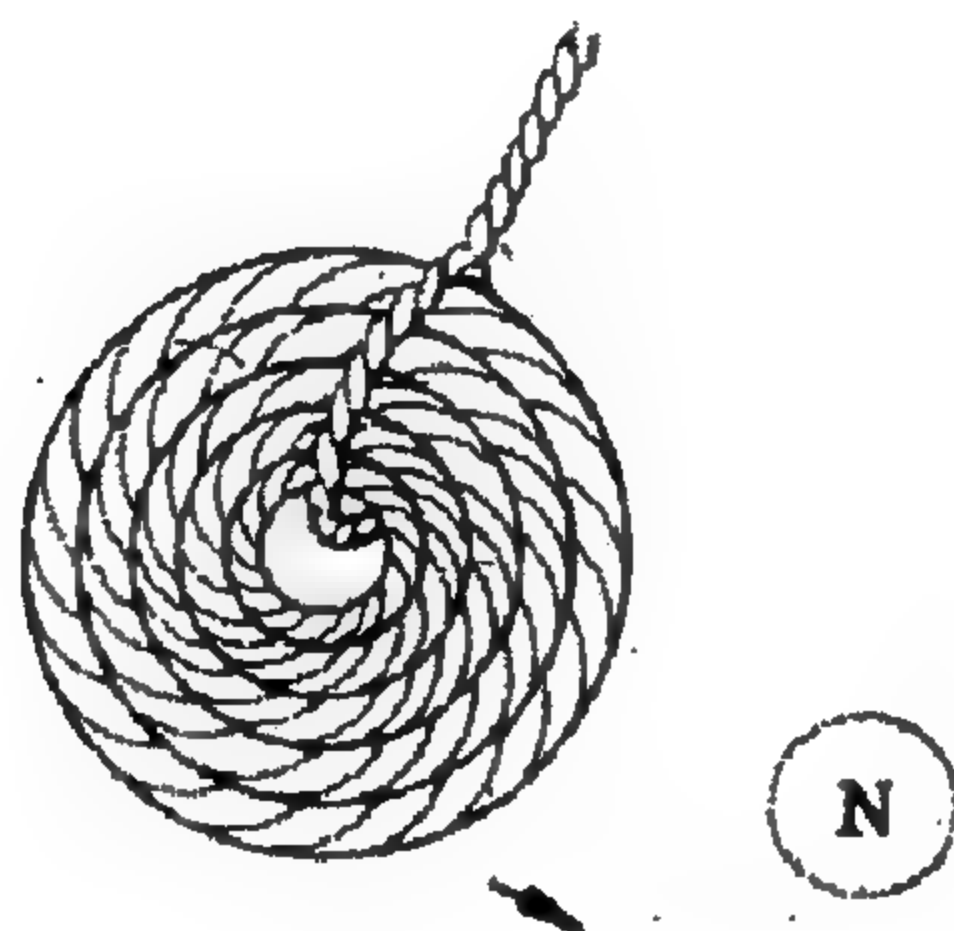
- ٧ - أن تستخدم قانون فاراداي بطريقة كمية في مواقف بسيطة كالمبينة في الأمثلة التوضيحية ٢٠ - ٢ ، ٢٠ - ٣ .
- ٨ - أن تعرف المحاثية المتبادلة والذاتية وأن تشرح سماتهم الكيفية في إطار قانون فاراداي .
- ٩ - أن تشرح بطريقة كمية لماذا تتولد بالسلك الذي يقطع خطوط مجال مغناطيسي ق . د . ك بين طرفيه ، وأن تحسب ق . د . ك هذه في حالة سلك يتحرك عموديا على خطوط المجال .
- ١٠ - أن ترسم تخطيطيا تفاصيل مولد بسيط للتيار المتردد ، وأن تشرح كيف ينتج عنه جهد متردد . وأن ترسم العلاقة البيانية بين الجهد والزمن .
- ١١ - أن تشرح معنى ق . د . ك خلفية لمحرك ما وكيف أنها تعتمد على سرعة المحرك .
- مصطلحات وعبارات هامة**
- يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :
- حركة جهاز القياس
- مقاوم مجزئ
- $$\tau = ANIB \sin \theta$$
- العزم المغناطيسي ، $\mu = IA$
- قانون فاراداي ، ق . د . ك $= -N (\Delta\phi/\Delta t)$
- قانون لنز
- المحاثية المتبادلة والذاتية
- ق . د . ك الحركية $B_{\perp} v d$
- الجهد الناشئ عن تيار متردد $V = V_0 \sin (2\pi f t)$
- ق . د . ك المضادة (أو الخلفية)

أسئلة وتقييمات

- ١ - ماهي العوامل الهندسية التي تؤثر في مدى حساسية حركة جلفانومتر ؟
- ٢ - لماذا يستعمل في الفولتيتر « الجيد » حركة أكثر حساسية عن تلك التي في الأجهزة الرخيصة ؟ ماهي أوجه الجودة ؟
- ٣ - لماذا يستعمل في الأميتر « الجيد » حركة أكثر حساسية عن تلك التي في الأجهزة الرخيصة ؟ ماهي أوجه الجودة ؟
- ٤ - يدعى مخترع أن لديه مولداً كهربائياً يستطيع تشغيل محرك ، يقوم بدوره بتشغيل المولد ، وتستخدم التيارات الإضافية من المولد في إضاءة مصابيح وخلافه . ماهو رأيك في هذه الفكرة ؟ لماذا ؟
- ٥ - يقودنا قانون حفظ الطاقة إلى استنتاج أن ق . د . ك المنتجة ذاتيا بالحث في ملف يجب أن تكون ق . د . ك مضادة . اشرح لماذا وهل ينطبق نفس الشيء على ق . د . ك المنتجة بالحث في محرك ؟ هل يمكن ابتكار آلة حركة دائمة لو أن ق . د . ك المنتجة بالحث لم تكن في الاتجاه المعطى بقانون لنز ؟
- ٦ - يقوم المحرك الحمل فوق طاقته دائما بحرق المصهر قبل أن يحدث تلف أكبر . اشرح ماالذي حدث .
- ٧ - اشرح لماذا يمكن تشغيل محرك يستعمل مغناطيسا دائما بواسطة تيار مستمر وليس تيار متردد بينما يمكن تشغيل نفس الموتور على النوعين إذا كان يستعمل به مغناطيس كهربي .
- ٨ - يحمل سلك طويل مستقيم تيارا على طول سطح منضدة مستوية . تستقر عروة مستطيلة من السلك فوق نفس المنضدة . إذا اطلقنا التيار في السلك الطويل ، فني أي اتجاه سوف يسري التيار المستحث في العروة ؟ ارسم شكلا للمواقع المختلفة بالنسبة للسلك مبينا في أي اتجاه سيمر التيار المستحث في العروة .

- ٩ - كيف يمكن التأكد من أن الأرض تتحرك خلال مجال مغناطيسي منتظم ؟ هل يمكن القول عما إذا كانت الأرض تتحرك خلال المجال أو أنها تحمل المجال معها دائما ؟
- ١٠ - تستقر حلقة نحاسية فوق منضدة وهناك ثقب في المنضدة يقع عند مركز الحلقة لو أن قضيبا مغناطيسيا ثبت رأسيًا بحيث كان قطبه الجنوبي أعلى المنضدة ثم ترك ليسقط خلال الثقب ، فصف القوى التي تؤثر على المغناطيس .
- ١١ - تتجه أنبوبة نحاسية طويلة جدا في الاتجاه الرأسي . صف حركة قضيب مغناطيسي أسقط بداخل الأنبوبة .
- ١٢ - هل من الممكن تصميم طائرة أو صاروخ بحيث يستفاد من التفاعل بين المجال المغناطيسي للأرض والتيار الكهربائي كآلية للدفع ؟
- ١٣ - هناك عزم مغناطيسي للالكترون ذاتة . كيف يمكن تفسير هذا وصفيًا في ضوء نموذج كرى للالكترون يقوم بعملية تدويم ؟ اجعل المناقشة ممتدة لتشمل النيوترون الذي ، على الرغم من كونه غير مشحون ، إلا أن له أيضا عزمًا مغناطيسيًا .
- ١٤ - بطارية 6V وصلت على التوالي مع مفتاح سكينى ، ومقاومة $2-\Omega$ ومحاثة ذاتية مقدارها $0.5H$. الوزن اللازم للتيار لكى يصعد إلى حوالى ثلثي قيمته العظمى بعد أن يغلق المفتاح هو $L/R = 0.25s$. احسب ق . د . ك المنتج بالحث في ملف المحاثة عندما (أ) يغلق المفتاح أولاً و (ب) عندما يفتح المفتاح فجأة . (ق)
- ١٥ - افترض أن كمية الشحنة التى يمكن وضعها على أسطوانة حاكى عند دلكها بقطعة من القماش الجاف هي $1 \times 10^{-6} C$. ماهو مقدار عزم اللي بالتقريب ، الذى يؤثر على الاسطوانة أثناء دورانها فوق منضدة دوارة في المجال المغناطيسى للأرض ؟ ماهو مقدار عزم اللي بالتقريب اللازم لدفع الأسطوانة من فوق المنضدة الدوارة ؟ (ق)
- ١٦ - حين تتأرجح مجموعة من العرى السلكية أمام قطب مغناطيسى شمالى ، كما في الشكل (م ٢٠ - ١) فإن تيارات دوامية تستحث فيها . وضح اتجاه التيارات في وقتين مختلفين وبين القوة المؤثرة على العرى . هناك تيارات دوامية مشابهة تنشأ في قطع صلبة من المعدن . اشرح .
- ١٧ - تستخدم التيارات الدوامية في مضاعلة حركة الملفات في الجلفانومترات الحساسة ، فتلك الملفات تكاد تكون عديمة الاحتكاك تمامًا ولذا فهي تتأرجح لفترة طويلة إذا سمع لها . ولكن عند توصيل طرفي الملف معا فإن الملف يتوقف عن التأرجح فوراً . لماذا ؟ تسمى هذه الظاهرة المضاعلة المغناطيسية .

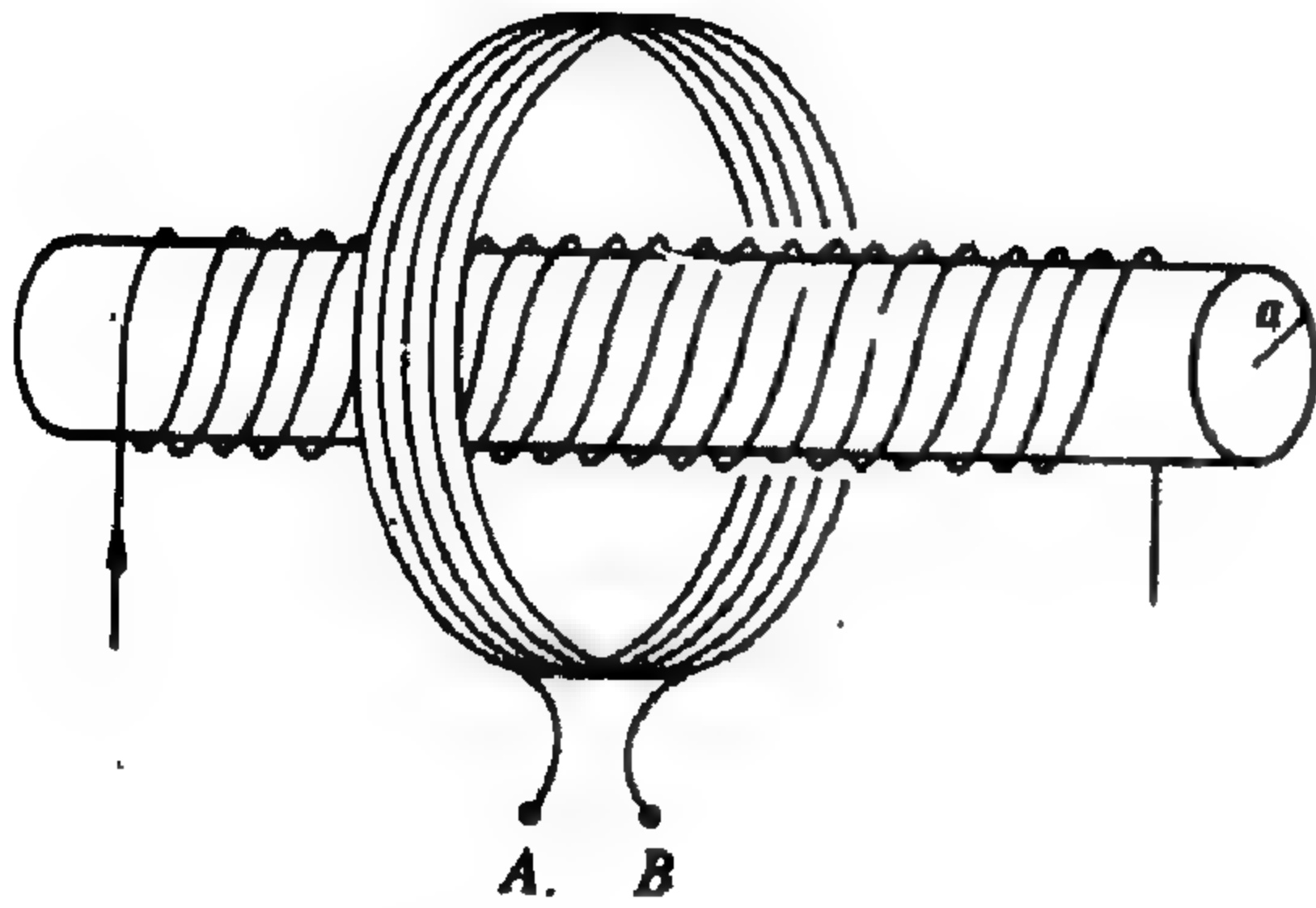
شكل م ٢٠ - ١



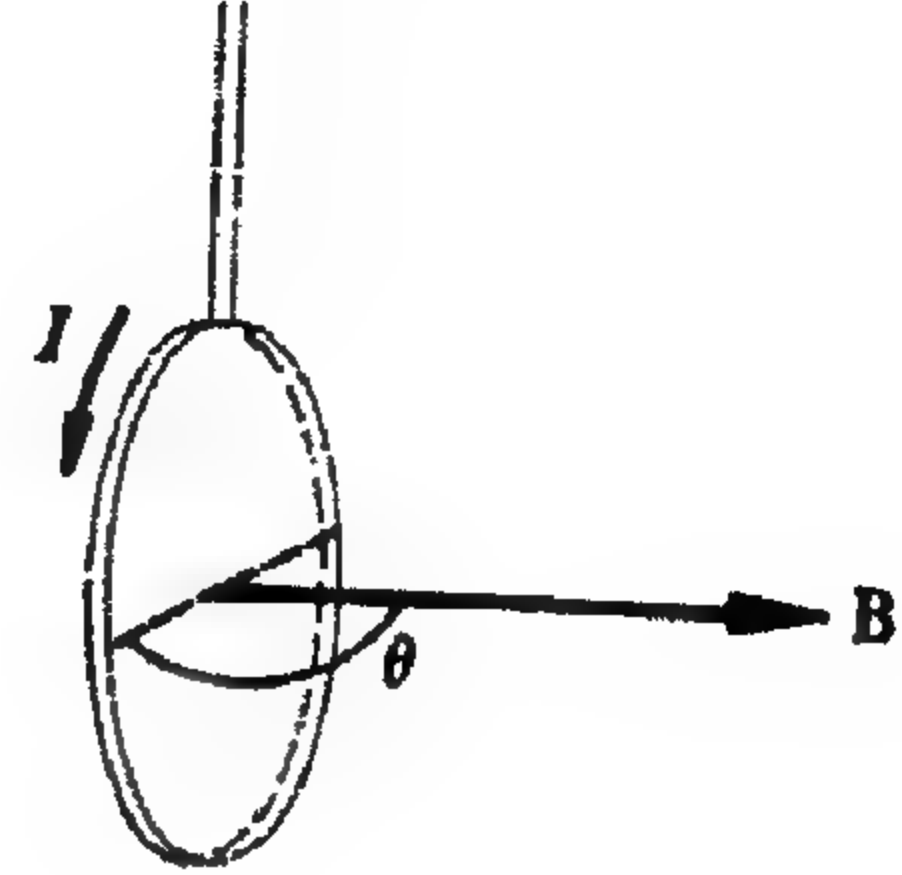
مسائل

- ١ - في جلفانومتر ما كانت الحركة ذات مقاومة قدرها 40Ω وتنحرف مع التدرج عند جهد قدره $100 mV$ عبر طرفيها . كيف يمكن تحويلها إلى أميتر $2. A$ ؟
- ٢ - إذا كانت حركة جهاز للقياس تنحرف مع التدرج لتيار قدره $0.010 A$ وكانت مقاومتها 50Ω كيف يمكن تحويلها إلى أميتر $5. A$ ؟
- ٣ - كيف يمكن تحويل حركة جهاز القياس الموصوفة في المسألة رقم (٢) إلى فولتميتر $2. V$ ؟
- ٤ - كيف يمكن تحويل حركة الجلفانومتر الموصوفة في المسألة رقم (١) إلى فولتميتر $50. V$ ؟
- ٥ - * كيف يمكن تحويل حركة جهاز القياس الموصوفة في المسألة رقم (٢) إلى أميتر ذى مدين $1 A, 10 A$ ؟
- ٦ - * كيف يمكن تحويل حركة جهاز القياس الموصوفة في المسألة رقم (٢) إلى فولتميتر ذى مدين $12 V, 120 V$ ؟

- ٧ - يحتوى ملف مسطح على 30 عروة من السلك ونصف قطر كل عروة هو 2.0 cm . ماهو العزم المغناطيسى لهذا الملف عندما يمر خلاله تيار قدره 5.0A ؟
- ٨ - يعلق الملف الموصوف فى المسألة (٧) فى مجال مغناطيسى كما هو مبين فى شكل م ٢٠ - ٢ . (أ) اوجد عزم التواء على (ب) هل يميل الملف الى الدوران بحيث يزيد أم ينقص من قيمة الزاوية (θ) ؟ الزاوية (θ) هى 120° .



شكل م ٢٠ - ٣



شكل م ٢٠ - ٢

- ٩ - * يحمل ملف دائرى نصف قطره 5.0 cm وبه 20 عروة من السلك تيارا قدره 25A . يستقر الملف على سطح منضدة أفقية ، ويسرى به تيار فى اتجاه عقارب الساعة حين ينظر إليه من أعلى . يؤثر على الملف المجال المغناطيسى للأرض والذي يتجه فى تلك النقطة شمالا وإلى أسفل بزاوية ميل قدرها 55° . تبلغ قيمة $B = 0.85\text{G}$ (أ) اوجد عزم التواء الناشئ عن B والذي يؤثر على الملف . (ب) أى أجزاء الملف سيحاول أن يرتفع من على سطح المنضدة ، الشمالى ، الشرقى ، الجنوبى أم الغربى ؟
- ١٠ - * يبين الشكل م ٢٠ - ٣ ملفا من السلك (نصف قطره b) ملفوفا حول ملف لولبى (نصف قطره a) . الملف اللولبى أكثر طولاً بكثير - عما هو مبين بالشكل . لو كان المجال المغناطيسى فى الملف اللولبى يتغير بمعدل 0.020 T كل ثانية ، (أ) اوجد ق . د . ك . المتجة بالحث فى الملف الخارجى الذى يحتوى على N عروة بينما يحتوى الملف اللولبى على n عروة لكل متر من طوله . (ب) لو أن قضيبا حديديا له $\mu = 300\mu_0$ وضع بداخل الملف اللولبى لكى يملأه ، فما هى ق . د . ك المتجة بالحث فى الملف الخارجى ؟
- ١١ - يتزايد التيار فى ملف لولبى ذى قلب هوائى بمعدل يبلغ 2.0 A/s . هناك 10^6 لفة من السلك بالملف اللولبى على كل متر من طوله ، وتبلغ مساحة مقطعه $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ هناك ملف ثانوى ذو 10^4 لفة ملفوف فوق الملف اللولبى . ماهى قيمة ق . د . ك المستحثة فى الثانوى ؟
- ١٢ - يبلغ متوسط المجال الناشئ داخل ملف حلقي ذى قلب حديدى 1.40T هناك ملف ثانوى ملفوف على الملف الحلقى ويحتوى على 100 لفة . لو أن مساحة مقطع الملف الحلقى كانت 0.5 cm^2 فما هو متوسط ق . د . ك المتجة بالحث فى الملف الثانوى إذا كان التيار فى الملف الحلقى يتوقف على مدى 0.010s ؟
- ١٣ - يمكن لقضيب مغناطيسى الحركة دخولا أو خروجا من ملف ذى 100 لفة بحيث يكون الملف محكما حول القضيب . لقد وجد أن ق . د . ك متوسطة قيمتها 0.30V تستحث فى الملف عندما يلج القضيب فيه فجأة على مدى 0.10s . إذا كانت مساحة مقطع المغناطيس 2.0 cm^2 ، فما هى قيمة B فيه ؟
- ١٤ - * ملفان ملفوفان بإحكام على نفس القلب الحديدى . تبلغ مساحة المقطع لكليهما 4.0 cm^2 حين يسرى تيار مقداره 3.0 A فى الملف الابتدائى فإن B تكون 0.20 Wb/cm^2 . هناك 100 لفة على الملف الثانوى . (أ) ماهى قيمة ق . د . ك المتجة بالحث فى الثانوى إذا كان التيار فى الابتدائى ينخفض بانتظام إلى الصفر فى زمن قدره 0.05 s ؟ (ب) ماهى الهاتئة المتبادلة للملفين ؟

- ١٥ - **محتوى ملف لولبي طويل ذو قلب حديدي على 1000 لفة ومساحة مقطعه 4.0 cm^2 عندما يمر تيار قدره 2.0 A خلاله فإن $B=0.5 \text{ T}$. (أ) ماهى ق . د . ك المنتجة بالحث بالملف إذا أطفئ التيار على مدى 0.10 s ؟ (ب) ماهو مقدار محاثته الذاتية ؟
- ١٦ - تطير طائرة معدنية موازية للأرض في اتجاه الغرب بسرعة تبلغ 200 m/s لو كانت المركبة الرأسية لمجال الأرض 0.80 G (أ) ماهو فرق الجهد بين طرفي الأجنحة اللذين يبعدان عن بعضهما 25 m ؟ (ب) أى طرف من أطراف الأجنحة سيكون موجبا - الشمالى أم الجنوبى ؟ (ج) هل يمكن قياس فرق الجهد هذا ؟ (د) لو كان الأمر كذلك فكيف ؟
- ١٧ - قرر مهندس أن يضئ الانوار في محطة قطار باستخدام ق . د . ك المنتجة بالحث في محاور القطارات التى تسير على القضبان . بافتراض أن المركبة الرأسية لمجال الأرض هى 0.8010^3 Wb/m^2 وأن قضبان السكك الحديدية تبعد عن بعضها البعض 1.5 m ، (أ) ماهو مقدار ق . د . ك التى تنشأ بين القضبان عندما يمر قطار بسرعة 30 m/s ؟ (ب) هل يمكن استخدام فرق الجهد هذا داخل القطار المتحرك ؟ (ج) اذا كان الأمر كذلك فكيف ؟
- ١٨ - اذا كان الملف في مولد ما يحتوى على 200 لفة ومساحته 500 cm^2 وكان يدور في مجال مغناطيسى $B=0.60 \text{ Wb/m}^2$ فما هى سرعة دوران الملف حتى يمكن توليد جهد اقصى قيمته 150 V ؟
- ١٩ - كانت مقاومة الملف في محرك ما 5.0Ω . عندما يدور المحرك بالسرعة المقدرة فإنه يسحب تيارا قيمته 2.0 A من منبع 120 V . (أ) ماهى ق . د . ك المضادة في المحرك ؟ (ب) كم من التيار يسحبه المحرك إذا توقف الملف عن الدوران ؟
- ٢٠ - تستغرق المحركات الضخمة ما يقرب من الدقيقة حتى تصل إلى سرعتها عقب التشغيل . لأحد هذه المحركات مقاومة مقدارها 0.50Ω ويسحب تيارا قدره 8.0 A من منبع 120 V . ماهى قيمة المقاومة (مقاومة البداية) التى يجب توصيلها على التوالى مع المحرك إذا لم يكن ليسحب أكثر من 30 A عند بدء التشغيل ؟ (من الطبيعى أن هذه المقاومة تبعد فيما بعد) .

الفصل الحادى والعشرون التيارات المترددة والدوائر المفاعلة

لقد اهتممنا أساسا فى الفصول القليلة السابقة بالتيارات المستمرة ، أى بالتيارات التى تسرى باستمرار فى اتجاه واحد ، وقد رأينا فى الفصل السابق أن مصدر الجهد ذا القطبية المترددة يمكن الحصول عليه عند إدارة ملف فى مجال مغناطيسى ، ومثل هذا المصدر للجهد المتردد يؤدى الى ظهور تيارات مترددة تلعب بدورها دورا هاما . سنرى فى هذا الفصل كيف تتصرف هذه التيارات حين تمر فى مقاومات ومكثفات و محاثات .

٢١ - ١ شحن وتفريغ مكثف

لتبدأ دراسة الدوائر ذات التيار المتغير بفحص الدائرة البسيطة المرسومة في شكل ٢١ - أ . افترض أن المفتاح كان في البداية مفتوحاً وأنه لا توجد شحنات على المكثف ونريد أن نعرف ماذا سيحدث عندما يغلق المفتاح بشكل فجائي .

ستحاول البطارية أن تبعث تياراً ليسرى في الدائرة في اتجاه عقارب الساعة . وحيث أن المكثف لم تكن عليه أية شحنات في البداية ، فالتيار لا يحدده سوى المقاومة R . لهذا بمجرد إغلاق المفتاح (عند $t = 0$) فإن التيار يصبح $i_0 = V_0/R$ كما في شكل ٢١ - ب . لكن بمرور الوقت سيصبح المكثف مشحوناً وبهذا يقل التيار إلى المكثف ، وحين يصير المكثف مشحوناً تماماً فإن التيار يهبط إلى الصفر . ويوضح الشكل ٢١ - ب الطريقة الدقيقة التي يسلكها التيار في هذه الدائرة .

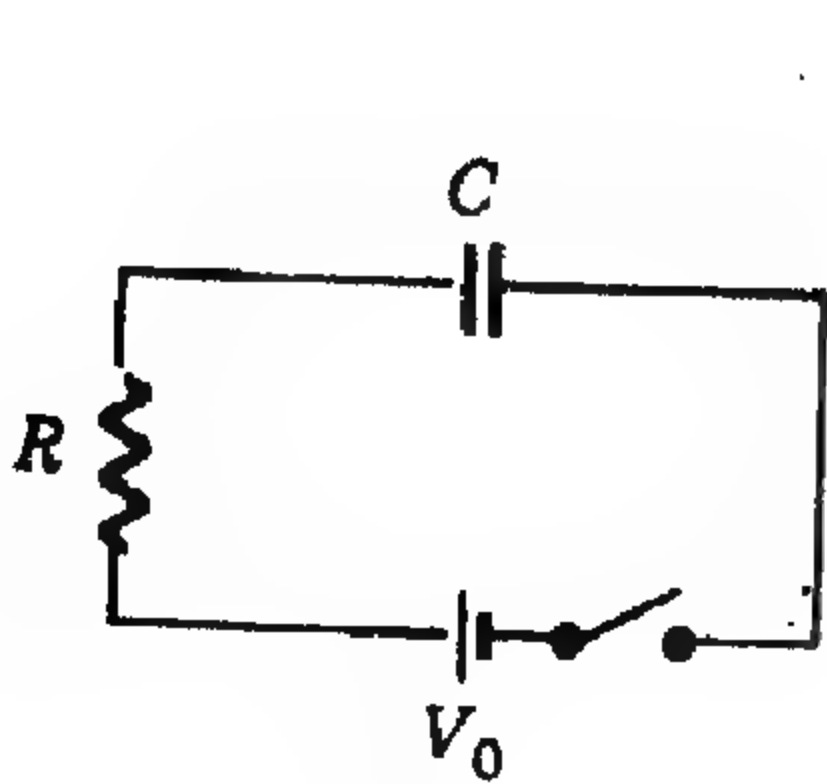
يسمى المنحنى الذي يتبعه التيار في الجزء (ب) منحنى الاضمحلال الأسى بتحليل الدائرة الموضحة في الجزء (أ) يوضح أن التيار ينخفض إلى ما قيمته $0.3679i_0$ في زمن يساوى حاصل ضرب R في C (من الشيق في استخدام الوحدات أن تحاول اثبات أن ohm.farad تكافئ ثانية s) .

يسمى حاصل ضرب RC الثابت الزمني لهذه الدائرة، وهو عبارة عن الزمن مقدراً بالثواني - اللازم للتيار لكي ينخفض بمقدار 0.37 مرة من قيمته الأصلية . عندما يسرى التيار في الدائرة فإن المكثف يشحن وحين تكتمل شحنته يصبح لدينا $q_0 = CV_0$ حيث q_0 هي شحنة المكثف وهي تتغير مع الزمن كما هو مبين في الجزء (ج) من الشكل . يلاحظ هنا أن الثابت الزمني يقيس الزمن بالثواني الذي يستغرقه المكثف لكي يصبح مشحوناً إلى ثلثيه . وكما نرى فالثابت الزمني هو مقياس تقريبي للزمن المطلوب لشحن مكثف .

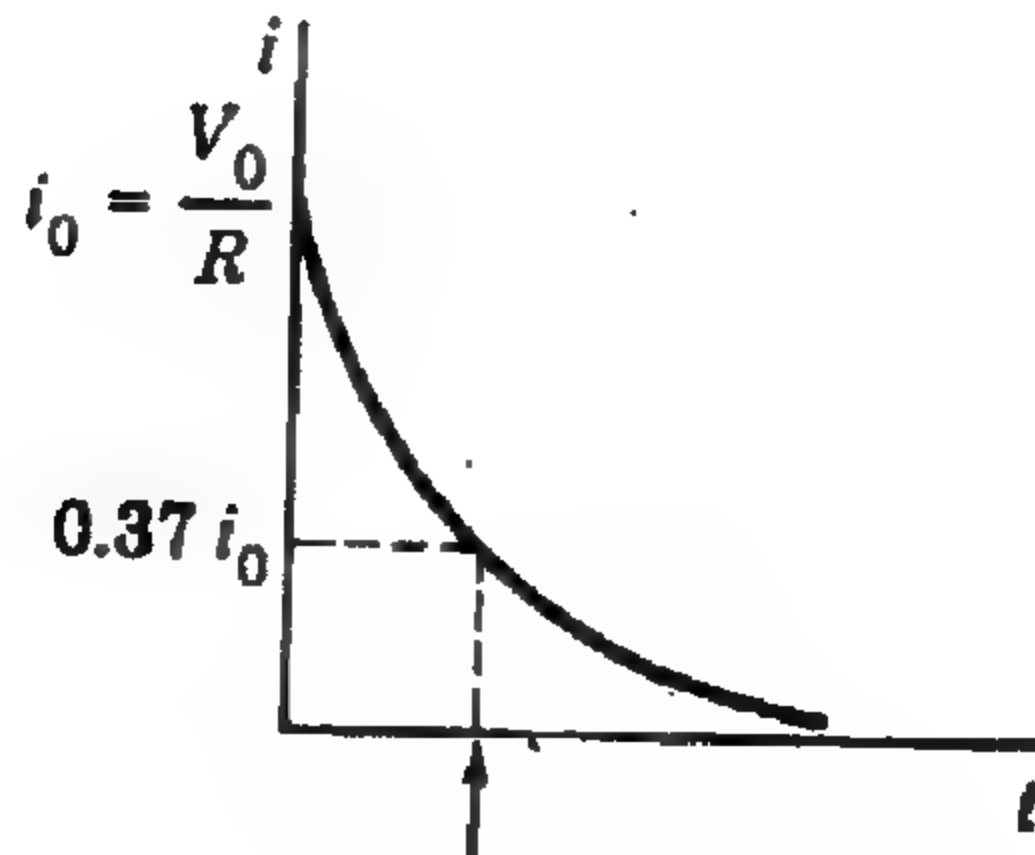
الثابت الزمني RC

شكل ٢١ - ١

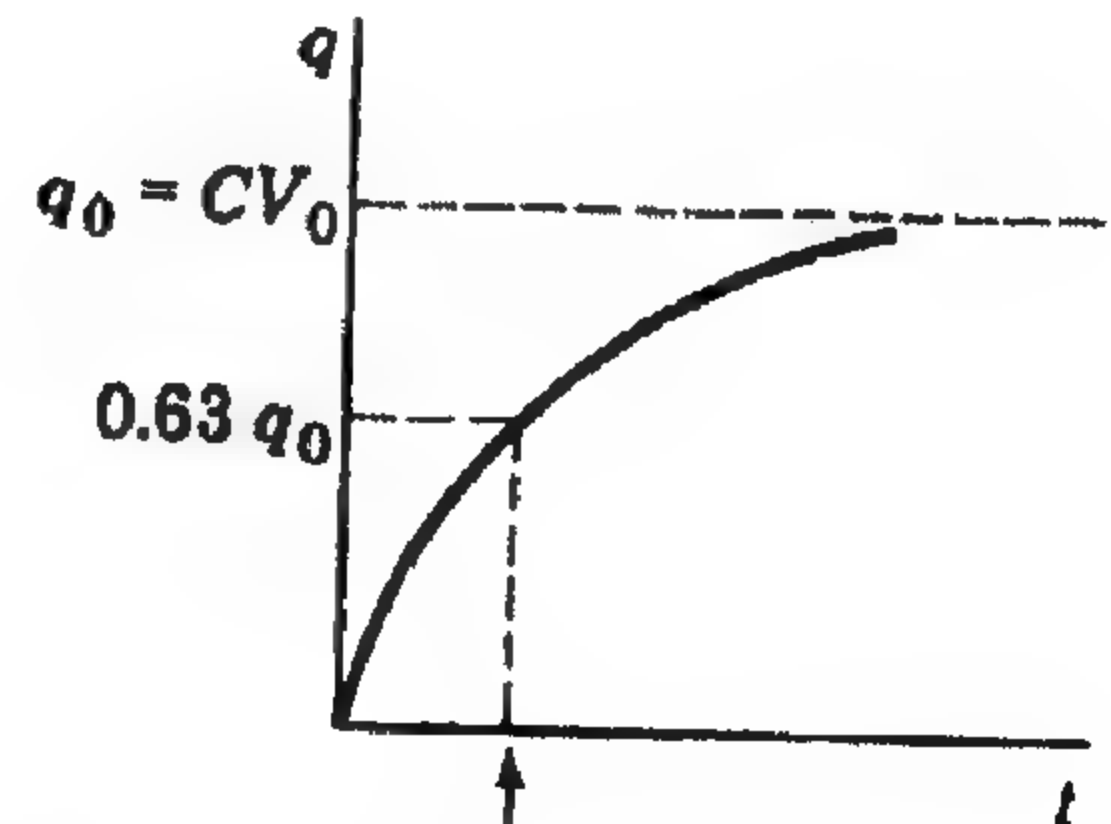
الثابت الزمني RC هو مقياس مناسب للزمن الذي يلزم المكثف لكي يشحن أو يفرغ



(أ)



(ب)



(ج)

الثابت الزمني RC =

لو أن مكثفا مشحونا C وصل مباشرة عبر مقاومة R فإن المكثف يقوم بالتفريغ خلالها . فإذا كان فرق الجهد بين طرفي المكثف في البداية هو V_0 ، فإن التيار الذي يسرى من المكثف أثناء تفريغه سيتبع منحنى كالمبين في الشكل ٢١ - ١ ب . يسلك تيار التفريغ بالنسبة للمكثف نفس السلوك الذي يسلكه تيار الشحن . أى أن المكثف يفرغ بمقدار الثلثين خلال ثابت زمنى واحد . وهنا أيضا يكون الثابت الزمنى RC مقياسا تقريبا للزمن المطلوب لهذه العملية .

مثال توضيحي ٢١ - ١ في معظم أجهزة التليفزيون يوجد مكثف يتم شحنه إلى فرق جهد يبلغ حوالى $20,000V$. وكإجراء للأمان يتم توصيل مقاوم عبر طرفي المكثف حتى يفرغ المكثف عقب إطفاء الجهاز . افترض أن هذا المقاوم الذى يطلق عليه مقاومة تجزئية كان $10^6 \Omega$ وأن $C = 10 \mu F$. ماهو الوقت التقريبى الذى يجب انتظاره حتى يمكن لمس المكثف بأمان بعد اطفاء الجهاز ؟

طريقة الحل : الثابت الزمنى لهذه الدائرة هو RC وعلى ذلك

$$\text{ثابت الزمن} = (10^6 \Omega)(10^{-5} F) = 10 \text{ s}$$

أى أنه بمرور $10s$ يكون المكثف قد فقد ثلثى شحنته تقريبا . فإذا مر زمن يبلغ عشرة أضعاف هذه القيمة فإن المكثف يكون بالضرورة قد أصبح فارغا . ولذا يجب الانتظار لمدة $100s$ قبل لمس المكثف في هذه الحالة .

هناك طريقة أكثر كمية لحل هذه المشكلة إذا توفرت لدينا السمة الخاصة للمنحنى ذى نمط الاضمحلال الأسى ، ففى مثل ذلك المنحنى تقل الكمية بمقدار $0.37 \approx 0.3679$ خلال كل ثابت زمنى أى أن $i = 0.37i_0$. وعند $t = RC$ فإن $i = (0.37)i_0$ ، وعند $t = 2RC$ فإن $i = (0.37)^2 i_0$ ، وعند $t = 3RC$ فإن $i = (0.37)^3 i_0$ وهكذا . بعد عشرة ثوابت زمنية فإن $i = i_0(0.37)^{10}$ وهى تساوى $4.5 \times 10^{-5} i_0$ بعد زمن قدره $t = 10RC$. فإن التيار والشحنة ينخفضان إلى 4.5×10^{-5} من قيمتهما الأصلية

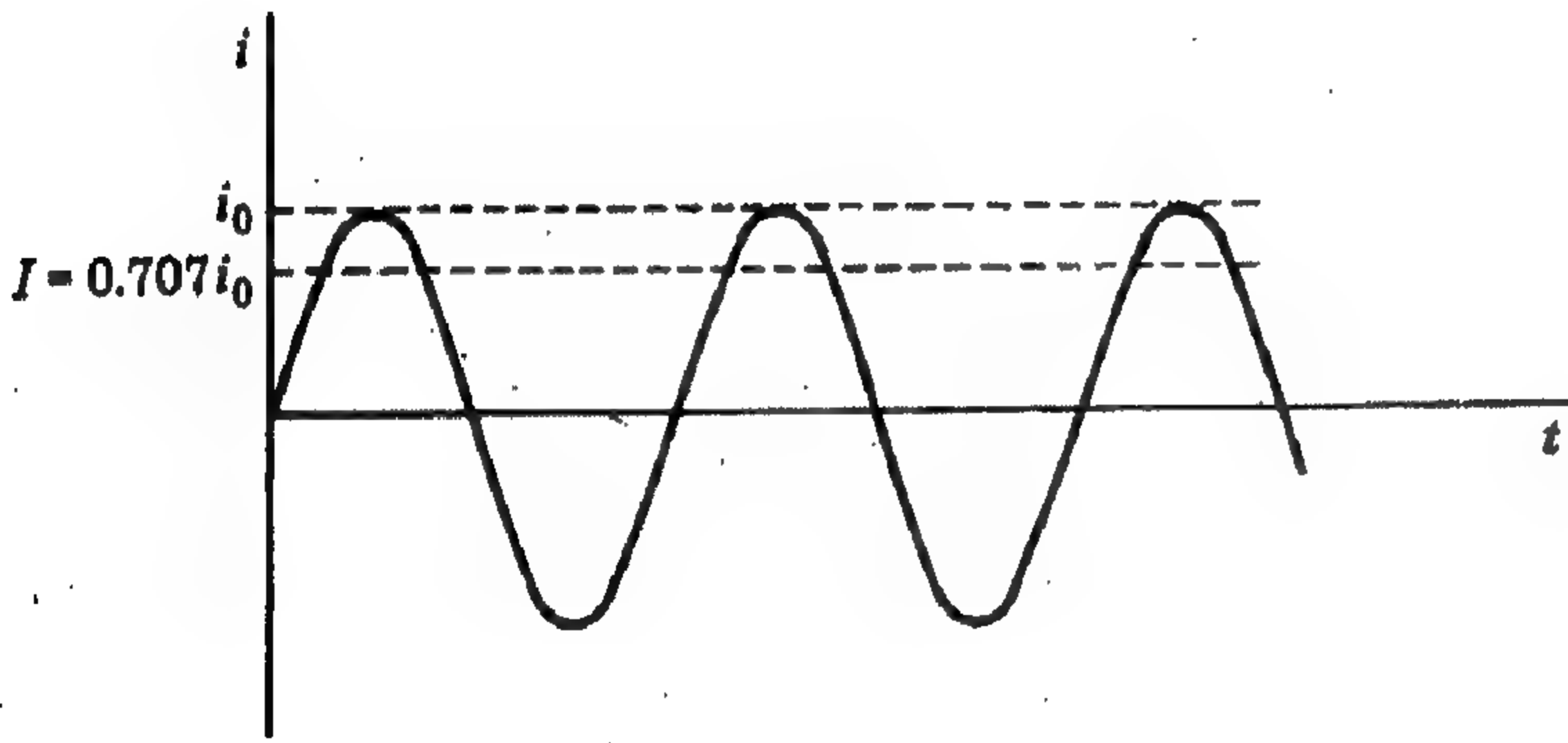
٢١ - ٢ مقادير التيار المتردد ، قيم جذر متوسط المربعات

قد يكون أوسع أنواع الدوائر التى يتغير فيها التيار انتشارا هو مانشير إليه بالرمز (ac) نسبة إلى التيار المتردد . لعلك تذكر أن الملف الذى يدور فى مجال مغناطيسى يؤدي إلى ظهور ق . د . ك جيبة وبسبب هذا النوع من ق . د . ك تيارا مترددا مثل الذى فى الشكل ٢١ - ٢ . والحقيقة أن هذا النوع من الجهود والتيارات هو

القيمة المتوسطة لكميات
التيار المتردد

ماتقوم شركات القوى الكهربائية بتوزيعه على عملائها . كل التيارات وفروق الجهد ذات الطابع الجيبي قيمتها المتوسطة تساوى الصفر في دورة كاملة أو أكثر . وحتى حين يصبح التيار المتردد السارى في سلك ما كبيرا بحيث يصير السلك ساخنا لدرجة الابيضاض (كما في المصباح المتوهج) ، فإن التيار المتوسط يكون صفرا . ويمكننا رؤية هذه الحقيقة بسهولة كما سنبين الآن .

يكون التيار المتردد المبين في شكل ٢١ - ٢ موجبا بقدر ما يكون سالبا . لإيجاد قيمته المتوسطة علينا أن نجمع قيمه معا عند فترات مختلفة ثم نقسم المجموع على عدد القيم التي جمعت . من الواضح أن عدد القيم السالبة سيتساوى مع عدد القيم الموجبة للتيار ، وعند جمعها معا سيكون الناتج صفرا أى أن التيار المتوسط صفرا . وباتباع نفس الأسلوب في التفكير سنجد أن القيمة المتوسطة للجهد متردد هي أيضا صفرا .



شكل ٢١ - ٢
يكون التيار الفعال أو جذر
متوسط مربع التيار rms
بالنسبة لتيار متردد مساويا
 $i_0 / \sqrt{2}$

يمكن للتيار المتردد القيام بشغل مفيد دائما على الرغم من أن قيمته المتوسطة صفرا ، إلا في حالة بعض التطبيقات مثل الطلاء بالكهرباء وشحن البطاريات .

عند استخدام الكهرباء لإنتاج حرارة في مقاوم ، مثلا ، كما في المواقد الكهربائية فإن حقيقة انعكاس اتجاه التيار دوريا لا يكون لها أهمية فكل مايعنينا هو الحرارة المتولدة فقط وكما رأينا من قبل فإن هذا تحدده القدرة الكهربائية التي يتسلمها المقاوم وهي $i^2 R$ (لاحظ أن التيار مربع في هذه الكمية ولذا ليست هناك أهمية إذا كان سالبا أو موجبا) .

في الواقع ، نحن معنيون بمتوسط القدرة المعطاة إلى مقاوم أكثر من اهتمامنا بمتوسط التيار المار فيه . وعلى هذا فنحن نهتد لإيجاد القيمة المتوسطة للمقدار $i^2 R$. ولكن مقدار ثابت لذا فنحن فعلا نحتاج الى معرفة القيمة المتوسطة

جذر متوسط مربعات التيار وفرق الجهد

للمقدار i^2 . والقيمة المتوسطة للمقدار i^2 ومتوسط مربع التيار ، هي عبارة عن مجموعة من الأرقام الموجبة لأن i^2 دائما موجبة . بالنسبة لتيار (أو جهد) يتغير جيبيًا فإن القيمة المتوسطة للمقدار i^2 (أو v^2) هي نصف القيمة العظمى أو $\frac{1}{2}i_0^2$.
أما إذا أخذنا جذر هذه الكمية ، جذر متوسط مربع التيار (rms) فإن

$$I \equiv i_{rms} = \frac{i_0}{\sqrt{2}} = 0.707i_0$$

حيث i_0 هي القيمة الذروية للتيار المبين في الشكل ٢١ - ٢ . أما الجهد فيكون

$$V \equiv v_{rms} = 0.707v_0$$

حيث v_0 هي القيمة الذروية للجهد أثناء الدورة الجيبية . المقدار 0.707 هو نفسه $1/\sqrt{2}$. دائما ما تسمى قيم (rms) بالقيم الفعالة .

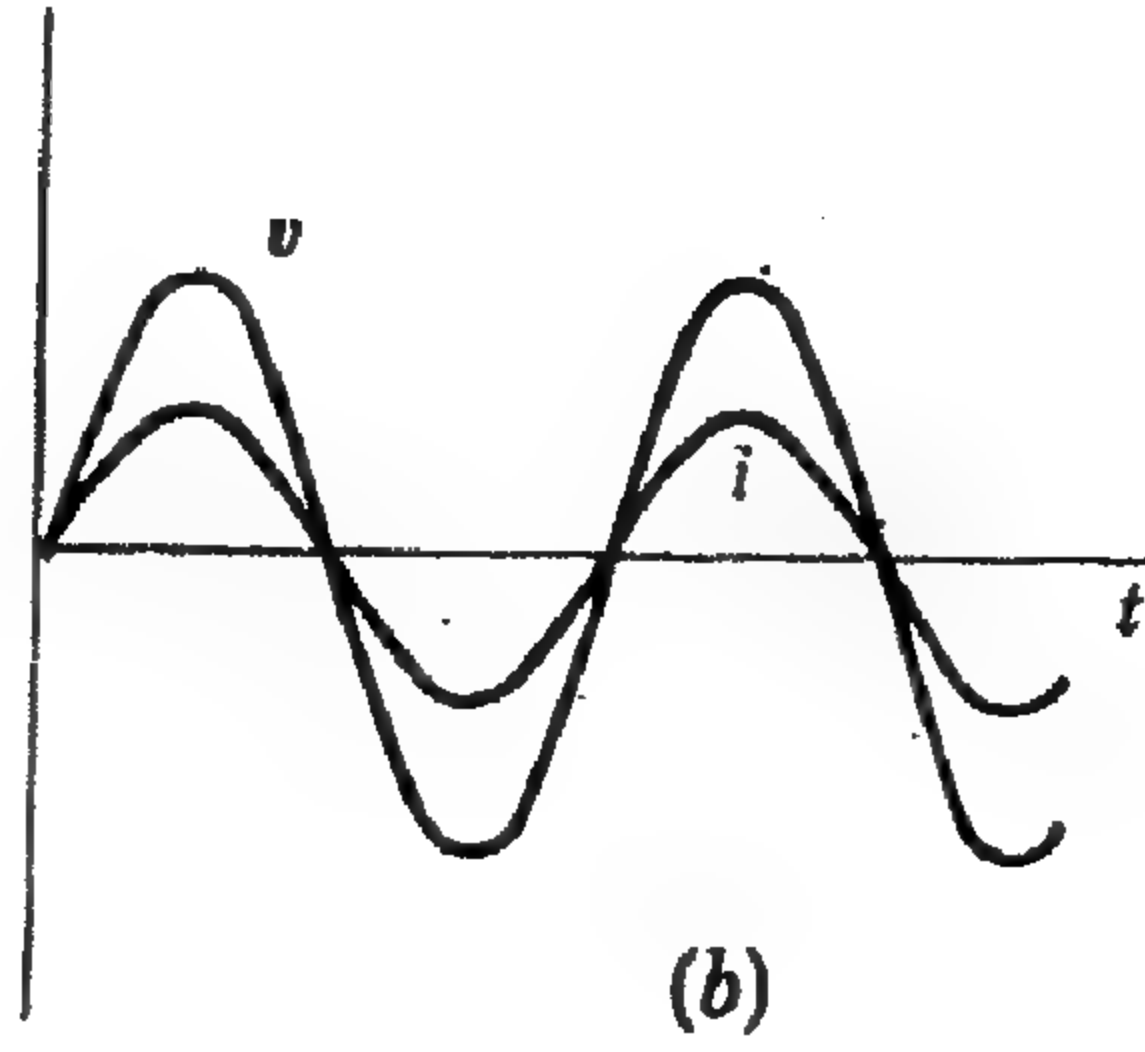
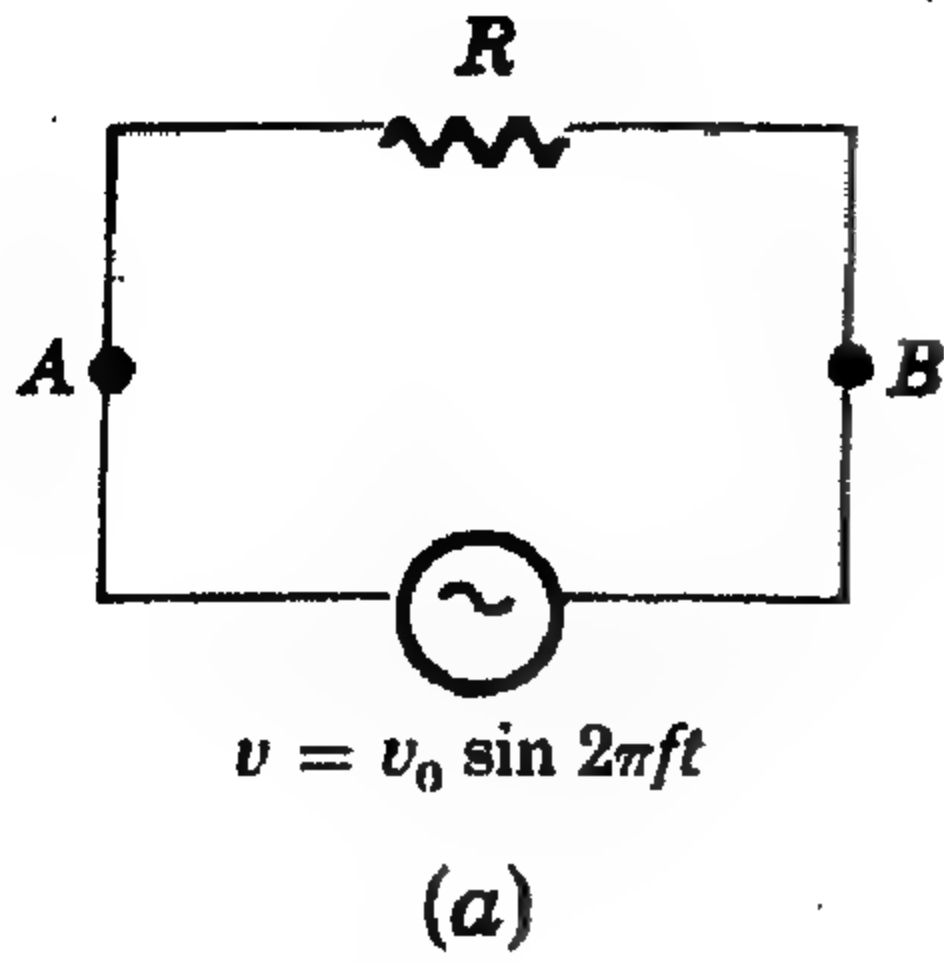
فقد القدرة في التيار المتردد

تقوم معظم أميترات وفولتميترات التيار المتردد بقراءة قيمة التيار أو الجهد الفعالين . ولكن قد تصادف من حين لآخر جهازا معايرا ليقرأ قيمة الذروة للجهد v_0 أو قيمة الذروة للتيار i_0 . ومن الطبيعي أن معظم أجهزة قياس التيار المستمر (dc) تقرأ القيم المتوسطة ولذا فهي لا تنحرف إذا وصلت إلى أنظمة تيار متردد (ac) . من الطريقة التي عرف بها التيار الفعال أو (rms) فإن فقد الطاقة في مقاوم هو I^2R حيث I هو قيمة (rms) للتيار . من الطبيعي في نظام التيار المستمر (dc) أن يكون تيار (rms) والتيار المتوسط والتيار اللحظي هي جميعا نفس الشيء* .

٢١ - ٣ دائرة المقاومة

سنقدم موضوع دوائر التيار المتردد عن طريق اعتبار ثلاثة عناصر مختلفة للدائرة كل في دوره بحيث يتصل العنصر بمصدر للجهد المتردد . لنعتبر أولا دائرة المقاومة البسيطة المبينة في الشكل ٢١ - ٣ . يفيدنا قانون أوم على الفور أن فرق الجهد من A إلى B هو iR تماما، وحين يكون فرق الجهد عند أقصى قيمة ، فإن التيار أيضا سيكون عند قيمته العظمى ، وحين يصبح فرق الجهد صفرا يصبح التيار صفرا كذلك . ويوضح الشكل ٢١ - ٣ ب هذا السلوك بيانياً . يقال في هذه الحالة أن التيار وفرق الجهد متطاوران أي لهما نفس الطور وذلك حين يتغيران معا خطوة بخطوة .

* نستخدم دائما الرمز I ، V للدلالة على قيم (rms) وهي في نفس الوقت قراءات أجهزة القياس ، أما الحروف i ، v نستخدم للدلالة على القيم اللحظية للجهد والتيار .



شكل ٢١ - ٣
يكون التيار داخل مقاوم
متطوِّراً مع فرق الجهد عبر
طرفيه .

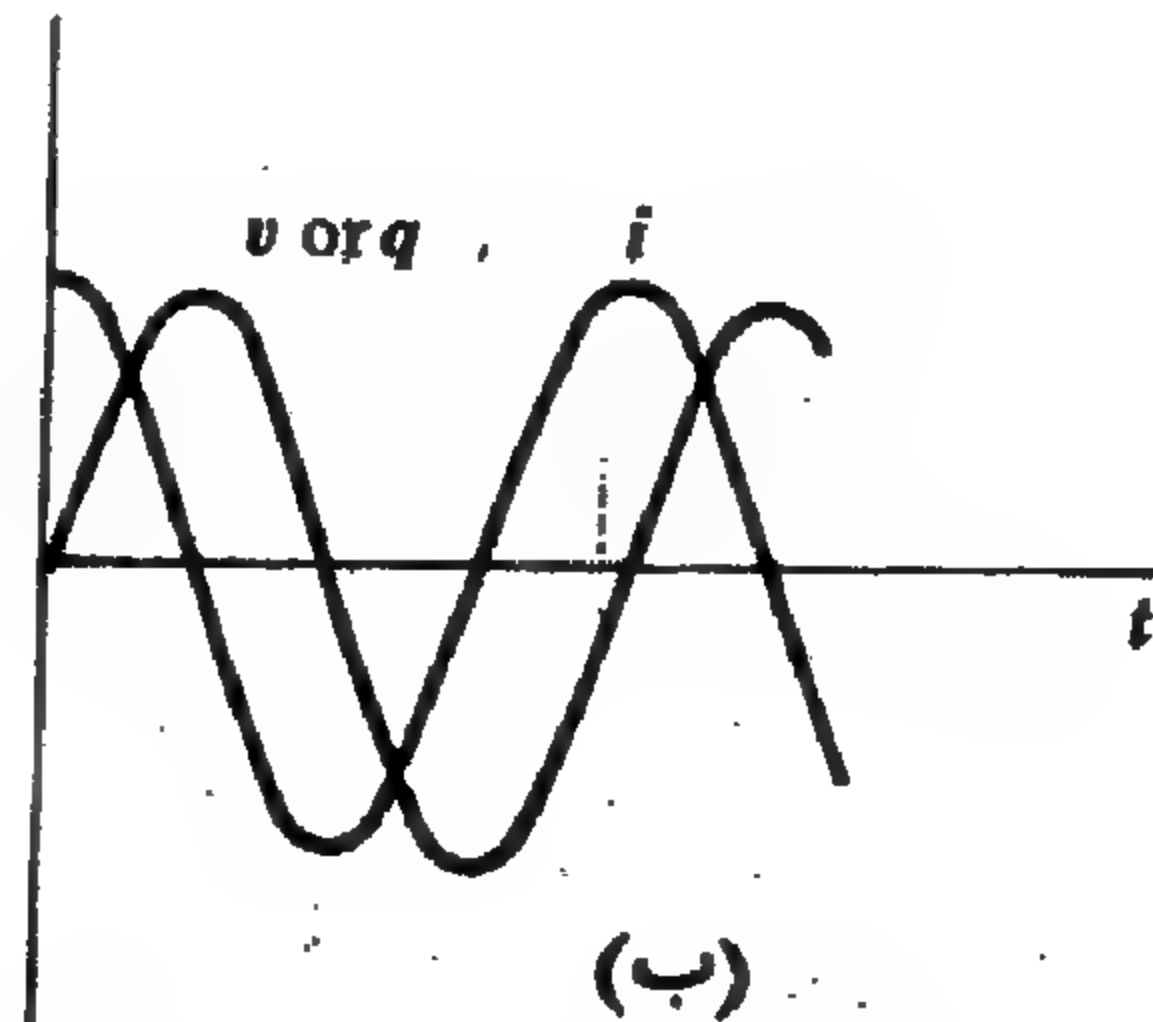
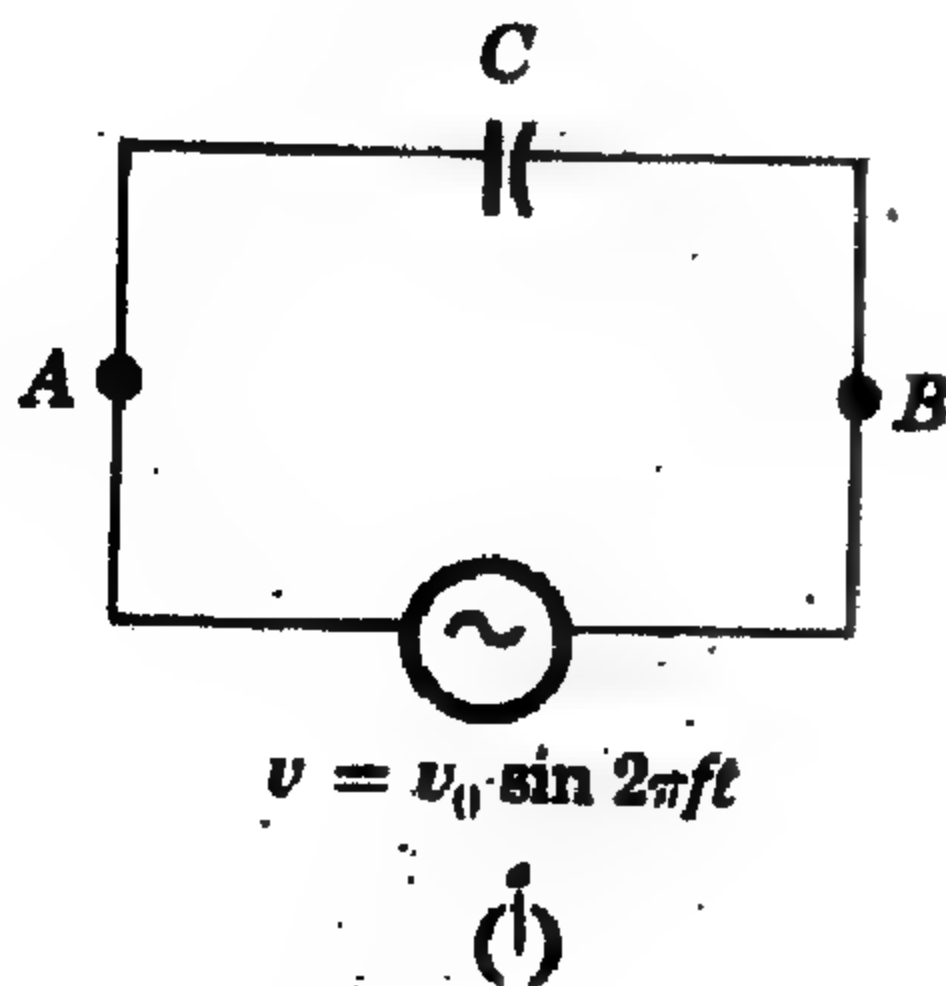
حددنا في القسم السابق أن فقد الطاقة في المقاوم هو $I^2 R$ ، وفي هذه الحالة الخاصة حيث لا يوجد سوى المقاومة فإن $I = V/R$ فإن فقد الطاقة يمكن كتابته على صورة أخرى وهي IV حيث I و V هما قراءتا (rms) لأجهزة القياس . سنرى في الأقسام التالية أنه لا يوجد متوسط لفقد الطاقة في مكثفات أو محاثات ، نقيه . كل فقد الطاقة في دوائر ac البسيطة يحدث في المقاومات .

٢١ - ٤ دائرة السعة

لنعتبر الآن دائرة السعة المبينة في الشكل ٢١ - ٤ . نعلم أن فرق الجهد من A إلى B يساوي جهد مصدر التيار المتردد $v_0 \sin 2\pi ft$. ولكننا نذكر أن فرق الجهد عبر مكثف يعطى بالعلاقة q/C ومن ثم يصبح لدينا

$$\frac{q}{C} = v_0 \sin 2\pi ft$$

وحيث أن C مقدار ثابت ، لذا فالشحنة على المكثف سوف تتذبذب قيمتها بنفس الطريقة كجهد المصدر ، فحين يكون جهد المصدر موجبا ، يشحن المكثف بشحنة موجبة . وحين يكون سالبا ، يشحن المكثف بشحنة سالبة . علاوة على ذلك ، تصل الشحنة إلى قيمتها العظمى في نفس الوقت الذي يصير فيه الجهد عند قيمته العظمى . وعلى هذا فإن منحنى الجهد مقابل الزمن سيبدو هو نفسه منحنى الشحنة مقابل الزمن كما هو واضح من الشكل ٢١ - ٤ ب .

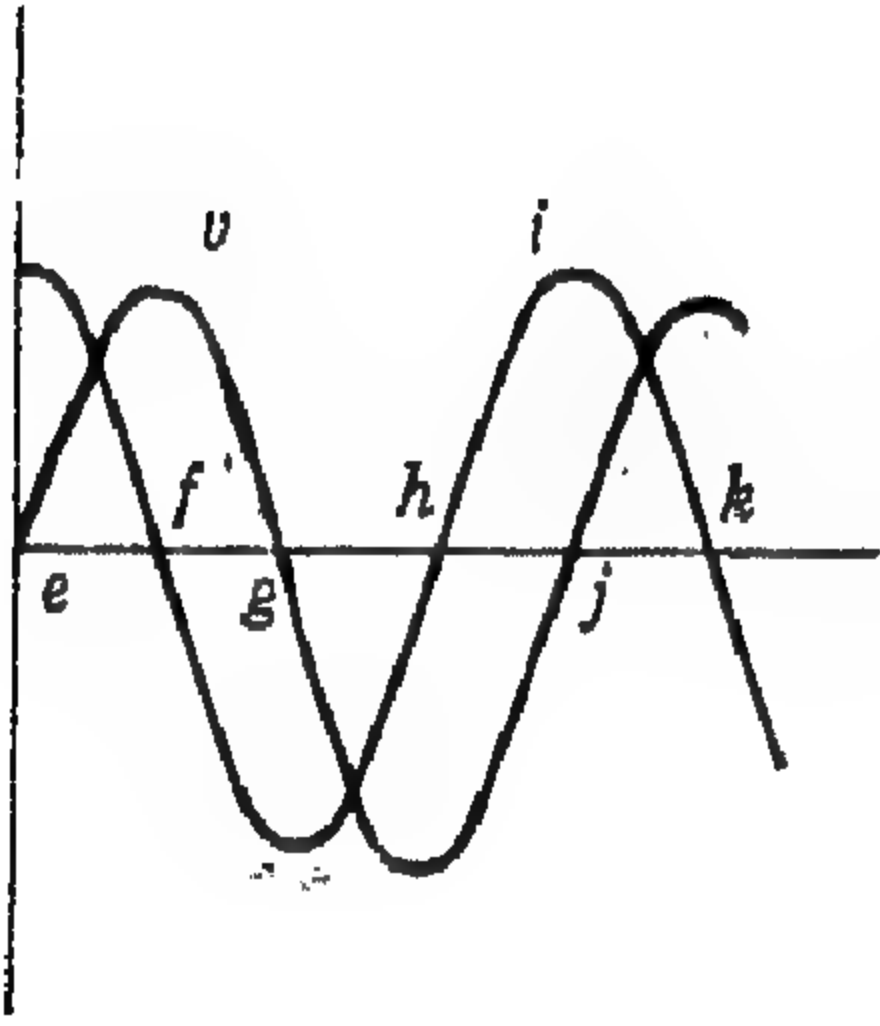


شكل ٢١ - ٤
يصل فرق الجهد بين طرفي
المكثف إلى القيمة العظمى
متأخرا عن التيار بمقدار ربع
دورة ويكون كل من فرق
الجهد والشحنة على المكثف
متطاورا .

لكى نرى كيف يتغير التيار مع الزمن لتذكر أن التيار هو معدل تغير الشحنة على المكثف $\frac{dq}{dt}$. ولكن الكمية $\frac{dq}{dt}$ ليست إلا ميل* المنحنى الذى ينتج من رسم q مقابل الزمن t . هذا المنحنى مبين فى الشكل ٢١ - ٤ ب . وماعلينا إلا أن نرسم ميله وبذا نحصل على منحنى التيار المار فى الدائرة . وهذا ما يوضحه المنحنى الأسود فى شكل ٢١ - ٤ ب .

شكل ٢١ - ٥

يقوم المكثف بسحب طاقة من مصدر الجهد خلال الفترات ef ، gh ، jk بينما يقوم خلال fg ، hj بدفع الطاقة مرة أخرى إلى مصدر الجهد .



لاحظ الآن ، أن التيار لا يساير فرق الجهد خطوة بخطوة ، فحين يكون التيار عند قيمته العظمى عند $t=0$ ، فإن فرق الجهد لا يصل إلى قيمته العظمى إلا متأخرا بمقدار ربع دورة . لذا يقال هنا أن التيار يتقدم فرق الجهد بمقدار 90° أو $\frac{1}{4}$ دورة فى مثل تلك الدائرة السعوية . وسنرى الآن ماذا يعنى هذا بالنسبة للطاقة المبذودة فى الدائرة .

خلال الفترة الزمنية من e إلى f فى شكل ٢١ - ٥ ، فإن التيار يخرج من الطرف الموجب لمصدر الطاقة (وذلك لأن كلا من v ، i موجبان) ، وعلى هذا فالمصدر يقوم بتوفير قدرة للدائرة . ولكن خلال الفترة fg من الدورة فإن التيار يسرى فعليا فى اتجاه ضد ما يود المصدر له أن يسرى فيه . أى أن المصدر يكون فى حالة شحن بدلا من أن يكون فى حالة تفريغ . فى الجزء gh من الدورة يقوم المصدر مرة أخرى بتوفير القدرة ، أما فى الجزء hj فإنه يشحن مرة أخرى .

من الواضح فى هذه الدائرة أن مصدر الطاقة يشحن أى يغذى بالطاقة بنفس القدر الذى يفرغ فيه أى يعطى طاقة للدائرة ، أى أن متوسط القدرة المسحوبة من المصدر صفر ومن هنا نرى أن المكثف ، على عكس المقاوم ، لا يستهلك طاقة . فالطاقة تختزن فى المكثف بواسطة المصدر لجزء من الدورة ولكن المكثف يعيد هذه الطاقة إلى المصدر أثناء تفريغه . ولعلك تذكر أننا بينا فى الفصل السابع عشر أن المكثف يقوم بتخزين الطاقة وأن كمية الطاقة المخزنة هى $\frac{1}{2}QV$

من الشيق أيضا أن نرى كيف يتصرف المكثف حين يتغير تردد المصدر . عند الترددات المنخفضة يمر تيار ضئيل جدا فى الدائرة ، وعندما يكون التردد صفرا ، أى ظروف تيار مستمر (dc) ، فإن التيار يكون دائما صفرا إلا فى اللحظة الأولى حين يشحن المكثف . لو أن تردد المصدر كان ، على سبيل المثال ١ cps ، فإن المكثف سي شحن ويفرغ مرة واحدة كل ثانية ويمر بعض التيار ولكن ليس كثيرا .

* ميل المنحنى هو بالضبط مائتيه الكلمة ، إذ أنه المعدل الذى يرتفع به المنحنى . فلو كان المنحنى مسطحا وأفقيا أى أنه لا يرتفع على الإطلاق ، لكان ميله صفرا . أما لو كان المنحنى يرتفع بسرعة فإن ميله يكون كبيرا . لو كان المنحنى ينخفض أى يهبط إلى أسفل فهو فى الواقع يرتفع بمعدل سالب ولذا يكون ميله سالبا .

ولكن إذا كان التردد مليون دورة في الثانية ، فإن المكثف سيشحن ويفرغ مليون مرة في ثانية واحدة ، ولما كان التيار هو معدل تغير الشحنة ، لذا فالتيار إلآن سيكون كبيرا لأن الشحنة تتغير بسرعة .

نتيجة لهذا فإننا نرى أن المكثف يجعل التيار صغيرا إلى أقصى حد في دائرة كالتي في الشكل ٢١ - ٤ أ حين يكون التردد منخفضا . ومن ناحية أخرى لايعوق سريان التيار عند الترددات المرتفعة ، أى أن المكثف يعمل كمقاومة كبيرة عند الترددات المنخفضة وكمقاومة صغيرة عند الترددات المرتفعة ، ولكنه لايسبب أى فقد في الطاقة نتيجة للتسخين . وقد كنا نود أن نتحدث عن « مقاومة » المكثف لولا الخوف من أن تؤدي هذه الكلمة إلى اللبس ، وعلى هذا سنرمز إلى مقدرة المكثف على اعاقا سريان التيار على أنها مفاعله . يمكن باستخدام حساب التفاضل والتكامل إثبات أن مفاعلة المكثف ترتبط بجذر متوسط مربع التيار (rms) والجهد بعلاقة من طراز قانون أوم ، أى

(٢١ - ١)

$$V = IX_C$$

شكر قانون اوم للمكثف

حيث X_C هى مفاعلة المكثف بوحدات ohm وتعطى بالمعادلة ،

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

تعتبر المعادلة التى تعطى مفاعلة المكثف (أو المفاعلة السعوية) منطقية ، فحين يكون التردد f صغيرا أو حين تكون سعة المكثف صغيرة فإن X_C ستكون كبيرة . وكألحنا سابقا ستكون X_C صغيرة حين يكون التردد كبيرا .

مثال توضيحي ٢١ - ٢ افترض أنه فى الدائرة التى فى شكل ٢١ - ٤ كان $C=0.4 \mu F$ وأن $v = 100 \sin(2\pi ft)$ وكانت $f = 20 \text{ Hz}$ واوجد تيار (rms) فى الدائرة . كرر بالنسبة للتردد $f = 2 \times 10^6 \text{ Hz}$ (تردد خط القدرة العادى 60 Hz) .

طريقة الحل : نعرف أن $V = IX_C$ حيث V و I هما قيم (rms) ، وحيث أن $V = 0.707 v_0$ ، وحيث أن $v_0 = 100 \text{ V}$ لذا نجد أن $V = 70.7 \text{ V}$ ولكن $X_C = 1/2\pi fC$ بالتعويض عن $f = 20 \text{ Hz}$ و $C = 0.4 \times 10^{-6} \text{ F}$ نجد أن $X_C = 19,900 \Omega$ وعلى هذا ،

$$I = \frac{V}{X_C} = 0.0036 \text{ A}$$

عند تردد يبلغ $2 \times 10^6 \text{ Hz}$ فإن نفس الخطوات السابقة تؤدي إلى ، ،

$$I = 355 \text{ A} \quad \text{و} \quad X_C = 0.199 \Omega$$

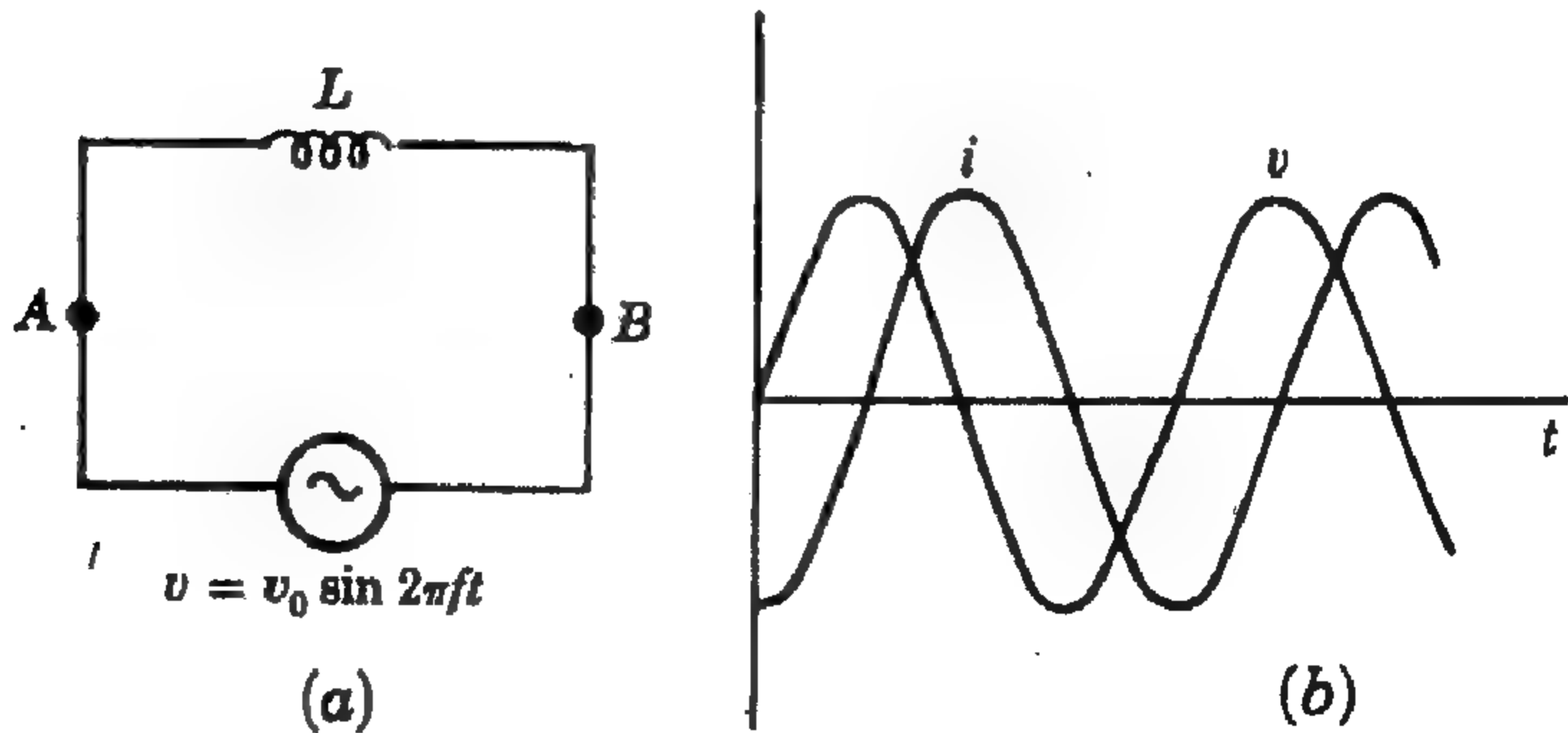
لاحظ أن ما قلناه من قبل صحيح تماما ، فعند الترددات المرتفعة تعاقب السعة التيار بأقل مما تفعل عند الترددات المنخفضة .

٢١ - ٥ دائرة المحاثية

يمكن معالجة سلوك دائرة المحاثية الذاتية البسيطة المبينة في شكل ٢١ - أ بنفس الطريقة التي استعملت لدائرة السعة* . نلاحظ أولا أن فرق الجهد بين النقطتين A ، B مساو لجهد المصدر $v_0 \sin 2\pi ft$ ، على أنه مساو أيضا للجهد المستحث في المحاثية نتيجة للتيار والتدفق المتغير في الدائرة . وقد رأينا في الفصل السابق أن هذا الجهد يساوي $L \Delta i / \Delta t$ بمساواة هاتين القيمتين ينتج أن

$$v_0 \sin 2\pi ft = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

حيث أن L مقدار ثابت فإننا نرى على الفور أن جهد المصدر يتناسب طرديا مع معدل تغير التيار المار في الدائرة ، ولكن معدل تغير التيار هو ميل منحنى العلاقة بين التيار والزمن ، وعلى هذا يكون لدينا طريقة لإيجاد أحد المنحنيين إذا علم المنحنى الآخر . يبين الشكل ٢١ - ب منحنيات فرق الجهد والتيار في دائرة محاثية . لاحظ أن منحنى فرق الجهد يتناسب بالفعل مع قيمة ميل منحنى التيار .



شكل ٢١ - أ
يتقدم فرق الجهد عبر المحاثية
التيار المار خلالها بمقدار 90°
أو ربع دورة . لاحظ الرمز
المستخدم للمحاثية .

* لاحظ أن الرمز $\text{---}\text{---}\text{---}$ قد استعمل للدلالة على ملف المحاثية .

هنا أيضا يكون التيار وفرق الجهد متفاوتين في الطور بمقدار 90° على أن فرق الجهد هنا يكون أمام التيار بزاوية 90° ويقال أن فرق الجهد يتقدم التيار بمقدار 90° في هذه الحالة .

يمكننا مرة أخرى استعمال نفس طريقة التفكير كما فعلنا في القسم السابق لنبين أن ملف المحاثية لا يستهلك أية طاقة في المتوسط . فعلى الرغم من أن المصدر يخزن الطاقة في ملف المحاثية خلال جزء من الدورة إلا أن الملف يعيدها إليه مرة ثانية خلال الجزء التالي من الدورة . وليس من العسير بيان أن الطاقة المخزنة في ملف المحاثية هي $\frac{1}{2}Li^2$. وإنك لتحسن صنعا إذا فحصت الشكل ٢١ - ٢١ب وتأكدت من الجزء الذي يقوم فيه المصدر بفقد طاقة والجزء الذي تعود فيه الطاقة إليه .

يعتبر السلوك العام لدائرة المحاثية ذا أهمية أيضا عند تغير تردد المصدر ، فنحن نعرف ، بالطبع ، أن ملف المحاثية سيحاول دائما معادلة أو معاوقة التغير في التيار . وفي الحقيقة تكون ق . د . ك . المنتجة بالحث بداخله هي $-L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ ، وهي تتناسب مع معدل تغير التيار . نتيجة لهذا ، حين يتغير التيار ببطء شديد فإن الأثر في ملف المحاثية لن يكون كبيرا ، ولكن عند الترددات المرتفعة ، حين يحاول التيار أن يتغير بسرعة ، فإن لإثر المعاوق للملف المحاثية يكون كبيرا جدا ويسمى هذا الأثر المعاوق المفاعلة الحثية X_L .

ترتبط المفاعلة الحثية X_L مع قيم (rms) للتيار المار فيها وفرق الجهد عبرها

(٢١ - ٢)

$$V = IX_L$$

شكل قانون اوم للمحاثية

حيث $X_L = 2\pi fL$ هي المفاعلة الحثية وكما توقعنا تكون مفاعلة ملف المحاثية كبيرة عند الترددات المرتفعة وصغيرة عند الترددات المنخفضة . كما أنها تقاس بوحدات الأوم . ohm

لاحظ أن المكثفات وملفات المحاثية تتصرف عكس بعضها البعض بالنسبة للتردد . فإثر المكثفات المعاوق للتيار يكون كبيرا عند الترددات المنخفضة وصغيرا عند الترددات المرتفعة . والعكس هو الصحيح في حالة ملفات المحاثية . ومن الطبيعي أن لإثر المعاوق للمقاوم لا يعتمد على التردد .

مثال توضيحي ٢١ - ٣ افترض أن ملف المحاثية في شكل ٢١ - ٦ قيمته 15 mH ، أما جهد المصدر كما تبينه قراءة جهاز قياس ac فهو 40 v ، بينما تردده 60 Hz اوجد التيار الذي يسرى به . كرر بالنسبة لتردد $6 \times 10^5 \text{ Hz}$

طريقة الحل : تستخدم الصورة الآتية لقانون أوم $V = IX_L$ في حالة تردد 60 Hz وجهد $V = 40 \text{ V}$

$$X_L = 2\pi fL = 5.65 \Omega$$

$$I = 40 \text{ V} / 5.65 \Omega = 7.1 \text{ A} \text{ عندئذ}$$

عند تردد مقداره $6 \times 10^5 \text{ Hz}$ ، تصبح قيمة $X_L = 5.7 \times 10^4 \Omega$ ومنها نجد أن $I = 7.1 \times 10^{-4} \text{ A}$. لاحظ إلى أى مدى ازداد أثر معاوقة ملف الحثاء عند الترددات المرتفعة إذا قورن بقيمته عند التردد المنخفض .

٢١ - ٦ دائرة LCR مجمعة

سنناقش باختصار الدائرة المتصلة على التوالى والمبينة في شكل ٢١ - ٧ والتي تحتوى على العناصر الثلاثة السابق مناقشتها في الأقسام السابقة . يكون قانون أوم المكافئ بالنسبة لهذه الدائرة هو

$$(21 - 3)$$

$$V = IZ$$

حيث

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

شكل قانون أوم لتسلسلة دائرة RCL

تسمى الكمية Z معاوقة الدائرة ووحداتها هي الأوم . من السهل ملاحظة أن المعادلة (٢١ - ٣) تختصر إلى الصور المعطاة في الأقسام السابقة في حالة وجود عنصر معاووق واحد وتكون باقى العناصر صفرا .

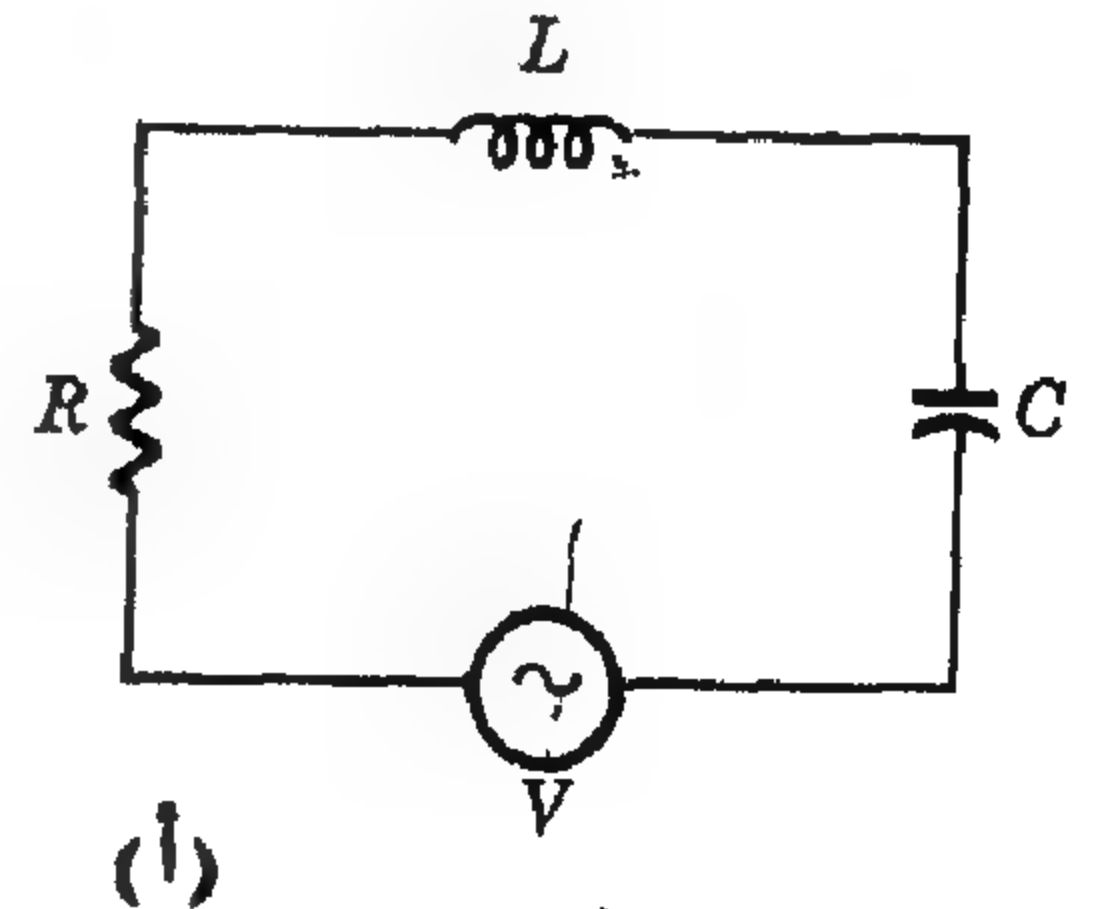
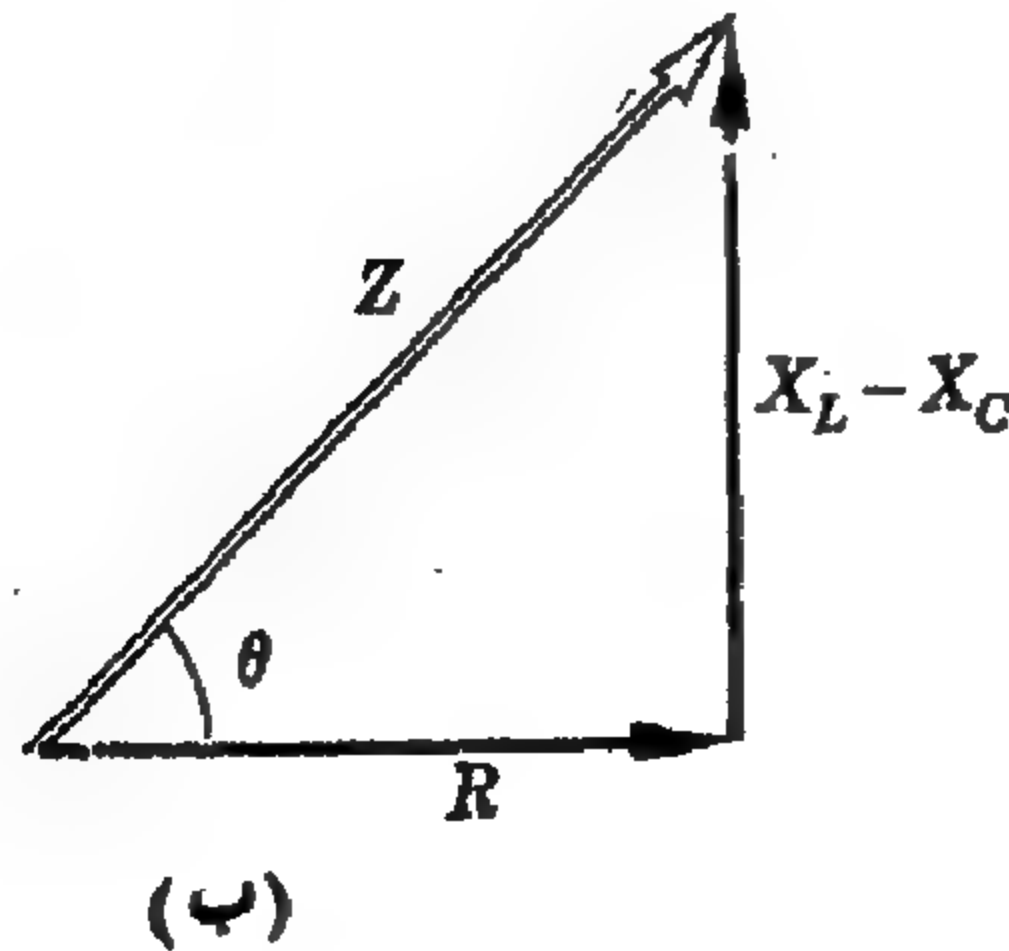
لا يكون التيار المار فى الدائرة التى فى شكل ٢١ - ٧ متطاورا مع فرق الجهد دائما ، فمن الممكن إيجاد الزاوية θ بين التيار وفرق الجهد بواسطة مخطط بيان المتجهات الموضح فى شكل ٢١ - ٧ ب . لو أن X_C و R كانوا صفرا ، فإن $\theta = 90^\circ$ ، أى أن التيار وفرق الجهد يتفاوتان فى الطور بمقدار 90° ، كما رأينا فى القسم السابق . عليك بإقناع نفسك بأن مخطط بيان المتجهات يعطى القيمة الصحيحة للزاوية θ حينما يكون كل من X_L و X_C صفرا .

شكل ٢١ - ٧

بما أن معاوقة الدائرة المرسومة فى (أ) هى :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

فمن الممكن تصور Z على أنها وتر المثلث قائم الزاوية المبين فى (ب) . والزاوية θ هى فرق الطور بين التيار وفرق الجهد .



القدرة المستهلكة في الدائرة الموضحة في الشكل ٢١ - ٧ هي $I^2 R$ ، وهذه نتيجة لمناقشتنا السابقة من أن فقد الطاقة يكون صفراً في حالة ملف محث أو مكثف نقيين ، ولما كان فرق الجهد عبر المقاوم لا يكون عادة هو نفسه جهد المصدر ، لذا يصبح واضحاً أن فقد الطاقة في الدائرة لا يمكن أن يساوي VI كما تحدث في دوائر التيار المستمر dc . ويتضح أن التعبير الصحيح لفقد الطاقة هو

فقد الطاقة في دائرة AC

$$VI \cos \theta = \text{القدرة}$$

(٢١ - ٤)

هو حيث θ هي زاوية الطور بين فرق الجهد والتيار كما هو مبين في الشكل ٢١ - ٧ . العامل $\cos \theta$ يسمى دائماً عامل القدرة . لاحظ أن $\theta = 0$ في دائرة مقاومة نقية ، ويكون عامل القدرة بالنسبة للمقاوم مساوياً للوحدة ، بينما لمكثف أو ملف محثه نقيين يكون عامل القدرة صفراً . لماذا ؟

مثال توضيحي ٢١ - ٤ افترض أن مصدر الجهد في الشكل ٢١ - ٧ كانت قيمة (rms) له هي 50V وكان التردد 600 Hz . افترض ايضاً أن $R = 20 \Omega$ ، $C = 10.0 \mu F$ ، $L = 4.0 \text{ mH}$.

اوجد (أ) التيار المار في الدائرة و (ب) قراءات الفولتميتر عبر R ، C ، L كل على حدة .

طريقة الحل : سنستخدم العلاقة $V = IZ$ ونوجد بناء على ذلك X_C و X_L عند التردد 600 Hz . لدينا ،

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = 26.5 \Omega \quad \text{و} \quad X_L = 2\pi fL = 15.1 \Omega$$

وبعد ذلك نجد أن

$$Z = \sqrt{(20)^2 + (15.1 - 26.5)^2} = 23.0 \Omega$$

والآن باستعمال $I = V/Z$ نجد أن $I = 2.17 \text{ A}$.

لإيجاد فرق الجهد عبر R ، نستعمل $V_R = IR$ وبمعرفة أن $I = 2.17 \text{ A}$ فإن

$$V_R = 43.4 \text{ V}$$

أما فرق الجهد عبر ملف المحث فيعطى بالعلاقة $V_L = IX_L$

$$V_L = (2.17)(15.1) = 32.8 \text{ V}$$

وبالمثل ، نجد أن

$$V_C = IX_C = 57.5 \text{ V}$$

لاحظ أن فرق الجهد عبر المكثف أكبر من جهد المصدر وهذا يشير إلى سمة خاصة لدوائر التيار المتردد (ac) وهو أن مجموع قراءات الفولتميتر حول دائرة مغلقة لا يكون صفرا ، و فروق الجهد لا تجمع بشكل صحيح إذا استعملت قراءات (rms) للجهد . هذه الحقيقة هي نتيجة للطبيعة المتوسطة لقراءات (rms) ، فهذه القراءات لا تمثل القيم اللحظية للجهد التي يمكن أن تكون موجبة أو سالبة . والجهد اللحظية هي التي يمكن جمعها بشكل صحيح ، أما جهود (rms) فهي دائما موجبة حسب التعريف . من الواضح ، إذن ، أن حاصل جمعها لا يمكن أن يعطى صفرا وعلى هذا لا يمكن تطبيق قاعدة العروة لكيرشوف على هذه القيم .

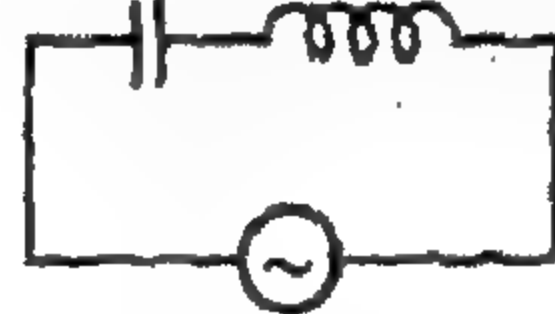
٢١ - ٧ الرنين الكهربائي

لدوائر Ac التي تحتوي على سعة ومحاثة ظاهرة رنين هامة . وبيان هذه الحقيقة ، اعتبر دائرة التوالي الموضحة في الشكل ٢١ - ٨ . نعلم أن التيار في هذه الدائرة التي لامقاومة فيها يعطى بالمعادلة ،

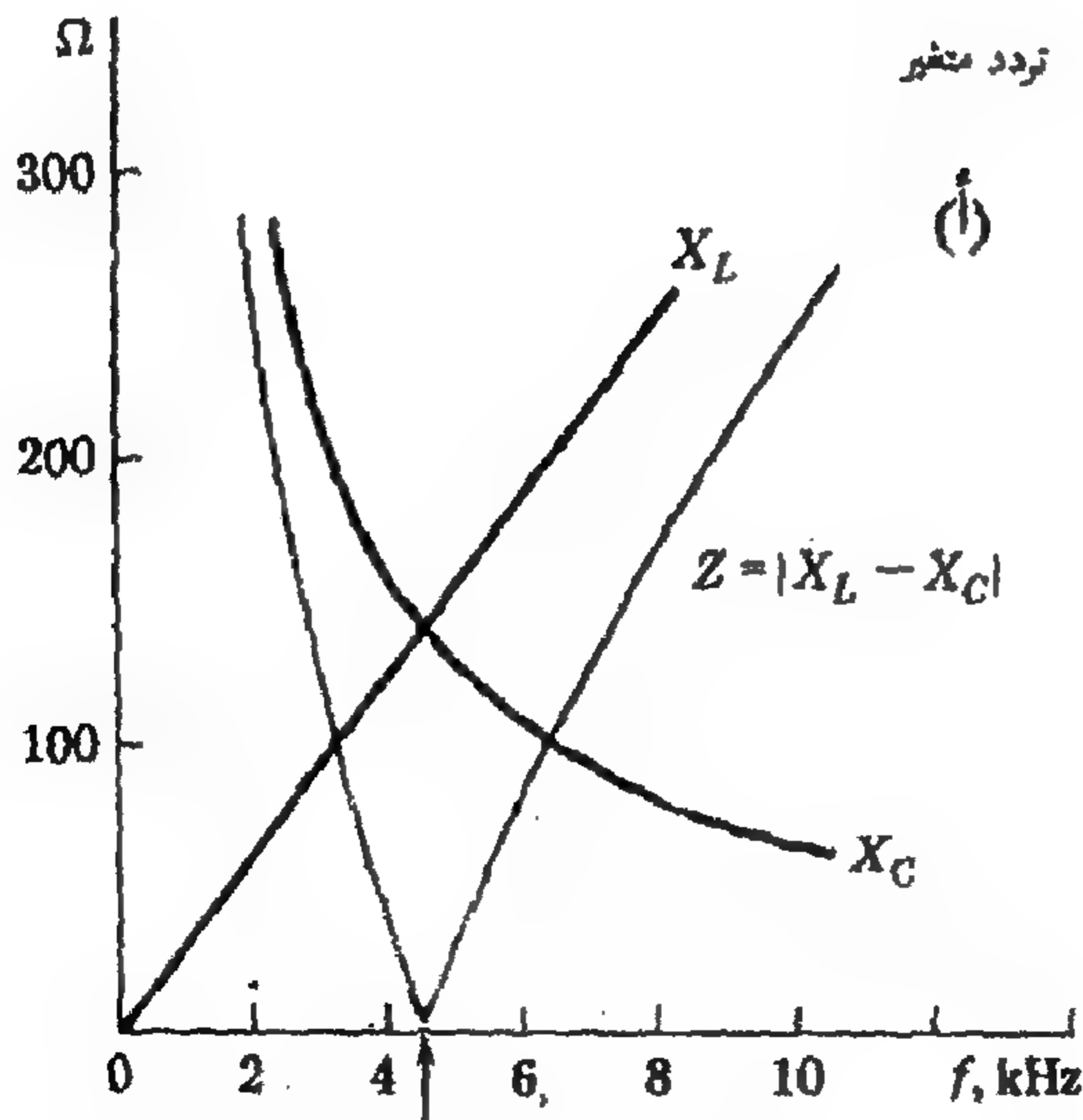
$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{X_L - X_C}$$

شكل ٢١ - ٨
عندما يتغير تردد المصدر في
(أ) فإن كلا من X_C ، X_L
يتغير كما في (ب) ويتغير تيار
الدائرة كما في (ج)

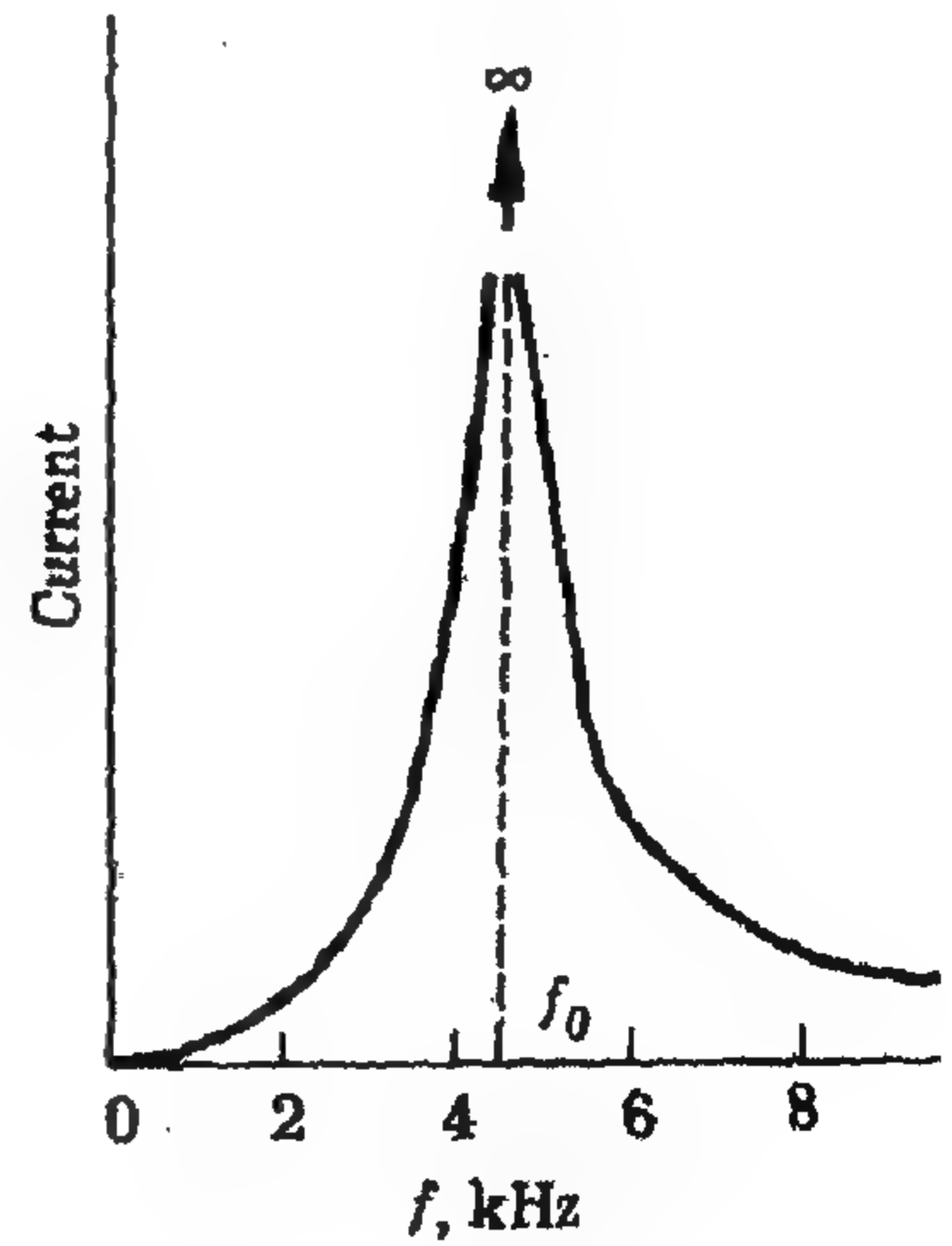
$$C = 0.25 \mu\text{F} \quad L = 5 \text{ mH}$$



تردد متغير



(ب) f_0 رنين



(ج)

لاحظ أنه عندما $X_C = X_L$ فإن التيار في الدائرة يجب أن يصبح لانهائيا

من السهل تحقيق الشرط $X_L - X_C = 0$ وذلك لأن X_L تتزايد مع التردد بينما تتضاءل X_C مع التردد . يبين الشكل ٢١ - ٨ ب كيف تتغير هذه الكميات مع قيم C و L المعطاة في هذه الدائرة . فالمعاوقة تصبح صفرا عند $f = 4500 \text{ Hz}$ في هذه الحالة . وهذا التردد وهو التردد الذي يصبح عنده $X_C = X_L$ يسمى تردد الرنين ويرمز له بالرمز f_0 . حيث أن $X_L = 2\pi fL$ و $X_C = 1/2\pi fC$ فإننا نجد عند الرنين أن

تردد رنين LC

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

ومن هنا نجد أن تردد الرنين هو

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (٢١ - ٥)$$

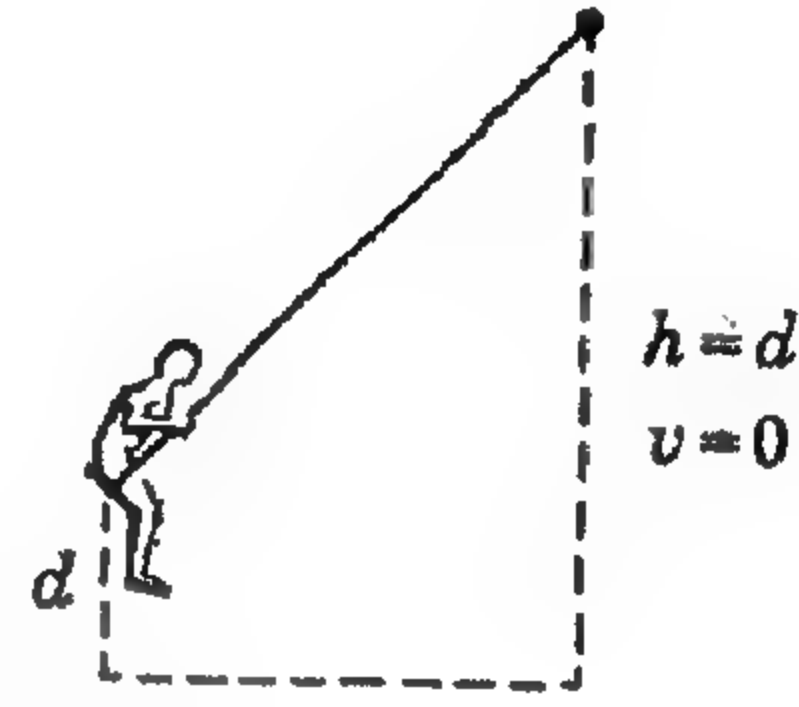
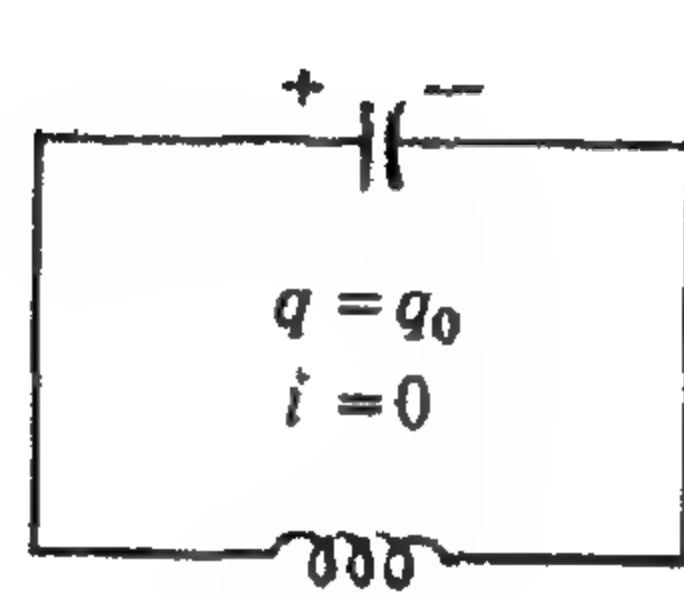
يبين الشكل ٢١ - ٨ ح كيف يتغير تيار هذه الدائرة كلما تغير تردد المذبذب (من الطبيعي أن جهد المذبذب يجب أن يحفظ ثابتا لجميع الترددات) . كما هو واضح فإن التيار يبلغ الذروة بشكل حاد عند تردد الرنين ، وفي الدوائر العملية تكون ذروة التيار ذات قيمة محددة وليست لانهائية لأن أسلاك الدائرة لها بعض المقاومة . وحتى مع هذا فإن التأثير هائل جدا وله تطبيقات كثيرة وهامة كما سترى في الفصل القادم .

نستطيع فهم الرنين الكهربائي بطريقة أفضل لو أننا أدركنا أنه يشبه كثيرا الرنين الميكانيكي . فانت تعرف أن الأنظمة الميكانيكية يكون لها دائما تردد طبيعي تهتز عنده . وإذا دفعت بهذا التردد فإنها تهتز بعنف ، أي أنها ترن .

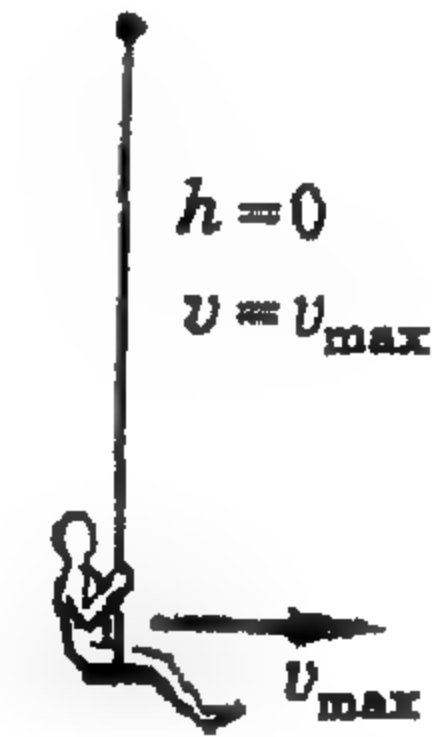
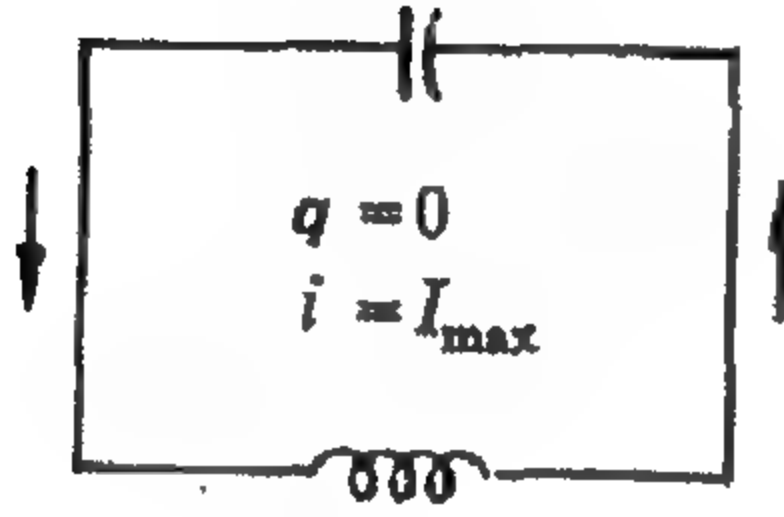
والدائرة LC البسيطة لها أيضا تردد طبيعي للاهتزاز ولنحاول استكشاف هذا التشابه بين الرنين في الأنظمة الكهربائية والميكانيكية اعتبر دائرة LC وطفل على أرجوحة كما هو مبين في الشكل ٢١ - ٩ . افترض أنه عند البداية كان التيار في الدائرة صفرا بينما كان الطفل في أعلى وضع للأرجوحة . إذا كانت الشحنة على المكثف هي q_0 فإن الطاقة المخزنة فيه ستكون $\frac{1}{2}(q_0^2/C)$. وبالمثل يكون للطفل على الأرجوحة طاقة وضع الجاذبية .

نحن نعلم أنه في النظام الكهربائي سيقوم المكثف بالبدا في التفريغ خلال ملف الحثاثة وسيترفع التيار ببطء - إلى حد ما - لأن ملف الحثاثة سيعاكس أى تغير في التيار . أما الطفل الذي على الأرجوحة فسيقوم بالبدا في اكتساب سرعة كلما تغلبت

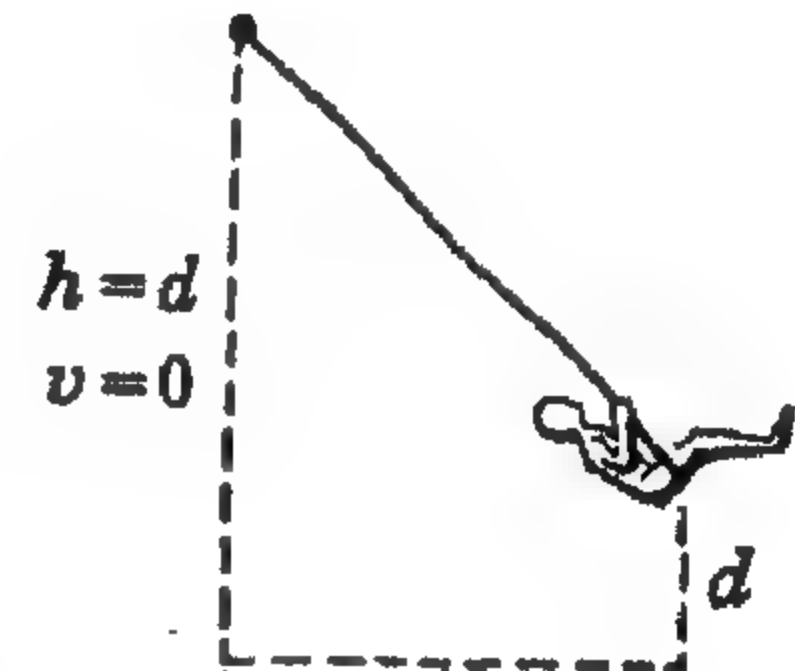
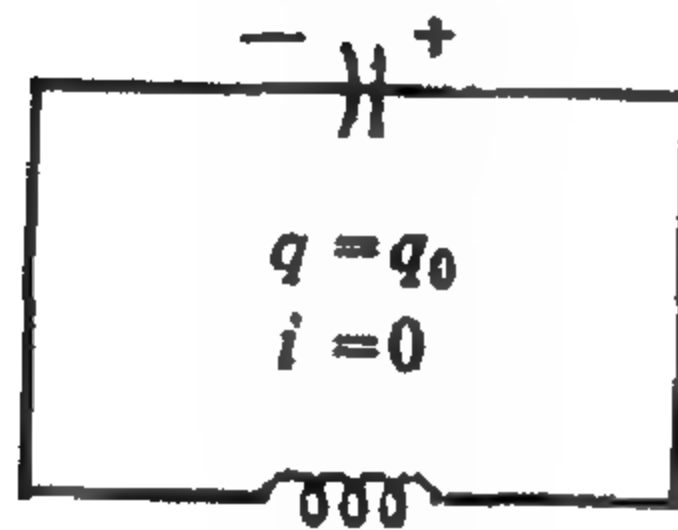
قوى التسارع على القصور الذاتي لنظام الأرجوحة . أى أن كلا من الطفل والمكثف قد بدأ يفقد طاقة وضع . وعندما تصل الأرجوحة إلى أدنى نقطة في المسار تكون طاقة الوضع قد تحولت تماما إلى طاقة حركة . وبالمثل بالنسبة للدائرة ، فعندما يفقد المكثف كل شحنته ، فإن التيار يمر بشدة في الدائرة وتختزن الطاقة الأصلية في ملف المحاثية بحيث تكون قيمتها $1/2 Li^2$ والموقف مصور في الجزء (ب) من الشكل ٢١ - ٩ .



(a)



(b)



(c)

شكل ٢١ - ٩
مثلا تتذبذب طاقة التارجح
بين طاقة وضع أو حركة فإن
طاقة الدائرة تتأوب أيضا في
التخزين إما في المكثف
المشحون وإما في ملف المحالة
الذى يحمل تيارا .

من الطبيعي أن طفل الأرجوحة لن يتوقف عند قاع المسار لأن القصور الذاتي للنظام سيجعله مستمرا في الحركة حتى يستقر في الوضع المين في (ح) من الشكل ٢١ - ٩ . وهنا تكون كل طاقته قد أصبحت طاقة وضع مرة أخرى . ونفس الشيء يحدث في الدائرة الكهربائية ، فالمحاثية لها نوع من القصور الذاتي ولذا فهي تعاكس أى تغيير في التيار فلا يتوقف مرة واحدة ولكنه يستغرق وقتا حتى يتوقف في النهاية حين يصير المكثف مشحونا تماما ، مرة أخرى كما في الجزء (ح) وتتكرر هذه العمليات مرات ومرات عديدة .

من الواضح ، إذن ، أن الدائرة الكهربائية تقوم بعملية تبادل للطاقة مثلما يحدث في حالة الطفل والأرجوحة ، فطاقة الطفل ستتأوب بين طاقة وضع وحركة بينما تتأوب الطاقة في الدائرة في التخزين إما في المكثف أو الملف . كلا النظامين سيتذبذب جيئة

وذهابا إلى الأبد ما لم يكن هناك فقد في الطاقة . في حالة الأرجوحة تؤدي قوى الاحتكاك إلى اضمحلال الاهتزاز في نهاية الأمر ، أما في الحالة الكهربائية ، فإن تأثيرات المقاومة تتسبب في فقد بعض الطاقة وهذا تأخذ سعة الذبذبات في الاضمحلال تدريجيا .

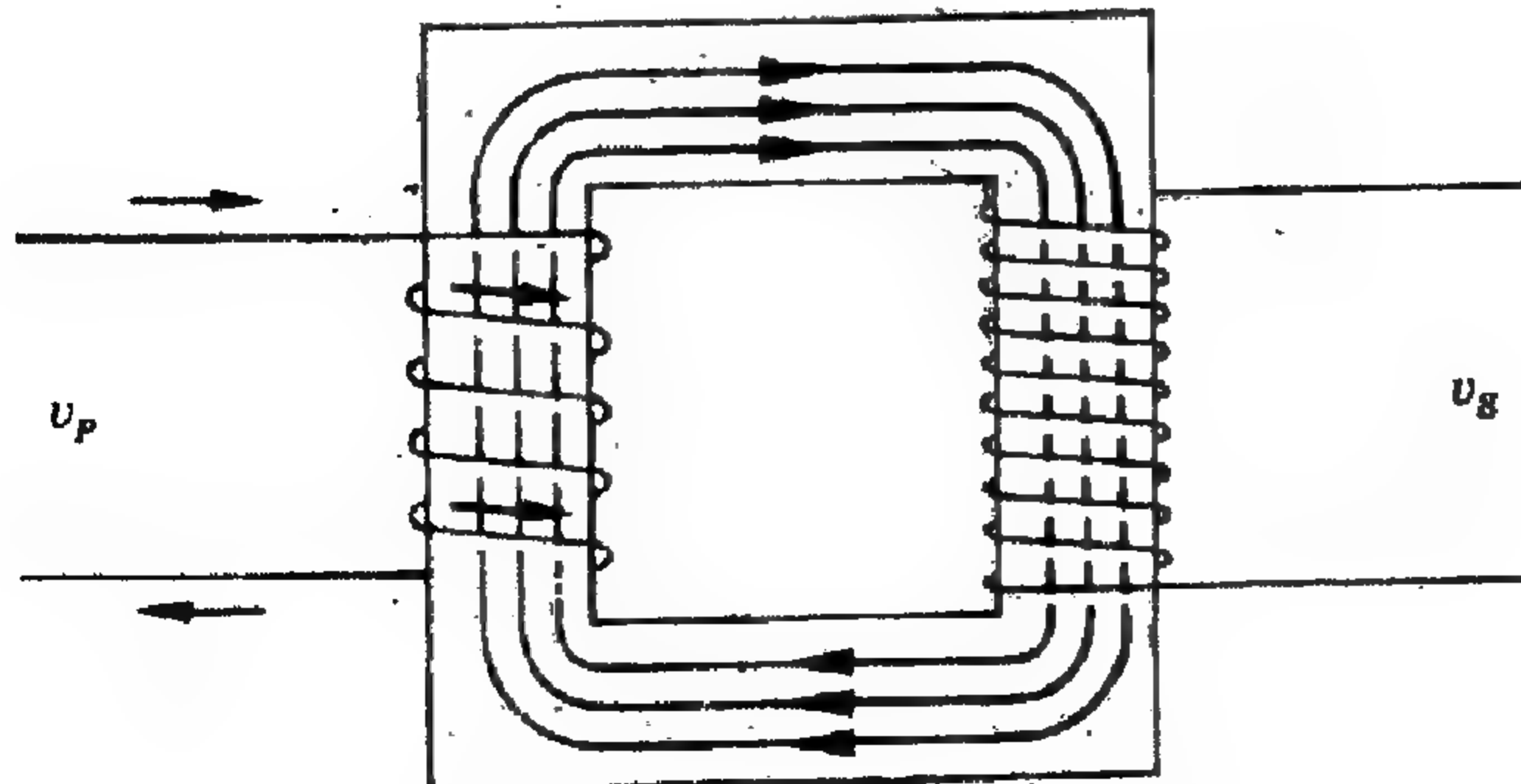
يمكننا التعمد في دراسة اوجه الشبه ، فكل من الطفل والتيار لهما ترددات رنين طبيعية خاصة بحركتهما . فالأرجوحة عبارة عن بندول ، سبق وأن حسبنا تردد ذبذباته الطبيعي في فصل سابق . أما في حالة الدائرة فتتكرر الرنين الطبيعي لها هو تردد الرنين الذي تم حسابه بالمعادلة (٢١ - ٥) .

إذا أردنا أن نجعل الطفل يتأرجح عاليا جدا فإنه يجب دفع الأرجوحة في الوقت المناسب وبنفس التردد المساوي لتردد زين الأرجوحة . ولقد رأينا أن تيارا شديدا يمكن أن يوجد في دائرة LC إذا قام المذبذب « بدفع الدائرة عند تردد رنينها . وهكذا فإن سلوك الرنين في النظامين متشابه تماما . سنرى في الفصل القادم أن دائرة LC الرنانة تشكل جزءا متكاملًا في أى جهاز استقبال للراديو أو التلفزيون .

٢١ - ٨ المحول ونقل القدرة

المحول هو محاطة متبادلة صممت بحيث تحول جهدا مترددا (ac) إلى جهد آخر متردد أكبر منه أو أصغر . يتكون المحول من ملفين من السلك ملفوفين على مقرن يشبه إلى حد ما النظام المبين في شكل ٢١ - ١٠ . يوجد جهد متردد v_p عبر طرفي الملف الابتدائي مما يسبب مرور تيار في هذا الملف وهذا التيار بدوره ينشئ تدفقا في الحديد كما هو مبين .

وحيث أن التدفق يتحرك وفق المقرن الحديدي لذا فهو يمر أيضا خلال الملف الآخر . ومن الطبيعي أن يتغير التدفق طول الوقت وذلك لأن v_p تتغير جيبيًا . يستحث هذا التدفق المتغير ق . د . ك جيبيية قيمتها v_s في الملف الثانوي .



شكل ٢١ - ١٠
محول رفع ذو قلب حديدي

لمعظم المحولات مقاومة ضئيلة جدا في أسلاكها ولهذا فإن التيار خلال الملف الابتدائي لا يجد مایعوقه سوى محاثه الملف نفسه . ولقد ناقشنا سلوك دائرة تحتوي على ملف محاثه متصل مباشرة مع مصدر جهد متردد بالتفصيل في القسم ٢١ - ٥ ، فلتلك الدائرة قمنا بمساواة الجهد الحافز بالقوة الدافعة الكهربائية المنتجة بالحث في ملف المحاثه . أما في الحالة الراهنة فإن لدينا من قانون غارادای أن

$$v_p = N_p \frac{d\phi}{dt}$$

حيث N_p هي عدد لفات الملف الابتدائي ، و $\frac{d\phi}{dt}$ هو معدل تغير التدفق خلاله . ولكن حيث أن التدفق يتبع المقرون الحديدي لذا فكل التدفق سيذهب خلال الملف الثانوي أيضا وعليه تكون v_s . د . ك المنتجة بالحث في الثانوي هي :

$$v_s = N_s \frac{d\phi}{dt}$$

بقسمة هذه المعادلة على معادلة الجهد عبر الملف الابتدائي ينتج أن

$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

على أن قيمة (rms) للجهد هي ببساطة $0.707v_r$ ، ولذا يمكن إعادة كتابة هذه المعادلة بدلالة V_p و V_s

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (21 - 6) \quad \text{معادلة المحول}$$

هذه هي معادلة المحول وتفيدنا عن كيفية ارتباط جهد الملف الثانوي بجهد الابتدائي . فالنسبة بين الجهدين كالنسبة بين عدد لفات الملفين ، وحين تكون N_s أكبر من N_p يكون V_s أكبر من V_p ويسمى المحول في هذه الحالة محول رفع لأنه يؤدي إلى زيادة الجهد . أما في عكس هذه الحالة يكون لدينا محول خفض .

حين لا تكون دائرة الملف الثانوي مغلقة فلا يمر تيار فيها ومن ثم لن يكون هناك فقد للطاقة في الملف الثانوي حين لا يكون قيد الاستعمال . وقد أشرنا من قبل في القسم ٢١ - ٥ أنه لا يوجد أيضا فقد في الطاقة في ملف محاثه عديم المقاومة . وهذه الحقيقة تتيح لشركات توزيع القوى أن تحتفظ بمحولاتها دائرة في جميع أنحاء المدينة ، حتى في حالة عدم استهلاك أحد للكهرباء التي يوزعونها ، فالمحولات نفسها تستهلك قدرا طفيفا جدا من الطاقة .

ولكن ، حين يسحب تيار من الملف الثانوى ، لتشغيل سخان مثلا ، فإن الطاقة تستهلك بواسطة السخان . وهذه الطاقة يجب أن يغذى بها الملف الابتدائى فى المحول حتى يقوم بنقلها إلى الملف الثانوى . أى أن فقد الطاقة فى الملف الثانوى - تحت هذه الظروف - يجعل الملف الابتدائى يبدو كما لو كانت له مقاومة محددة .

هناك العديد من استعمالات المحولات . أى جهاز راديو أو تليفزيون يعمل من خط قدرة لابد وأن يحتوى على واحد أو أكثر من المحولات . فمن الضرورى تحويل خط المنزل ذى الـ 120V إلى حوالى 5V لكى يمكن تشغيل المكونات الالكترونية . علاوة على ذلك ، تحتاج أنبوبة الصورة فى جهاز التليفزيون إلى جهد يبلغ 100 ضعف جهد الأنبوب بما يستلزم استعمال محول .

هناك استعمال آخر للمحولات فى مجال نقل القدرة ، فكثير من شركات القوى تقوم بإمداد مدن قد تبعد 100 km عن المولدات بالقدرة الكهربائية مما يشكل مشكلة حقيقية . افترض أن مدينة ما يسكنها 100,000 نسمة يستخدم كل منهم قدرة قيمتها 120 W مما يكافئ مصباحا أو اثنين مشتعليين لكل شخص وتكون القدرة المستهلكة هي $(100,000) (120) = 12,000,000$ W عند جهد يبلغ 120 V أو

$$VI = \text{القدرة الكمية}$$

$$120 I = (120) (100,000)$$

$$100,000A = I$$

حيث اعتبرنا عامل القدرة مساويا للوحدة .

حيث أن السلك المستخدم فى المنازل يمكنه بأمان أن يتحمل تيارا يبلغ فقط 30A بدون أن يحدث تسخين فوقى ، لذا فشرة التوزيع سيلزمها مايكافى 3000 من مثل هذا السلك لنقل القدرة إلى المدينة . وعلى الرغم من أن هذا ليس مستحيلا ، إلا أن تكلفة النحاس فقط تعتبر هائلة . على أن شركات القوى تقوم بالالتفاف حول هذه المشكلة بشكل جيد وذلك بمراعاة أن الكمية الهامة فى المشكلة هي VI وليست I بمفردها . لذا فهم يختارون أن ينقلوا القدرة لمسافات بعيدة عند جهود مرتفعة جدا . ففى المثال السابق لو أن $V = 100,000$ V فإنه يكون لدينا ،

$$(120)(100,000) = 12,000,000 \text{ W}$$

أو

$$I = 120 \text{ A}$$

ولهذا السبب تستخدم شركات القوى خطوط الجهد العالى لنقل القدرة لمسافات كبيرة .

من الطبيعي أنه لن يجزؤ أحد على توصيل هذه الجهود العالية مباشرة إلى المنازل ، فخطر الصعق بالكهرباء وحدوث الحرائق سيكون رهيبا ، لذا فهم يستخدمون بدلا من هذا محولات خفض لتحول هذه الجهود العالية إلى الجهد المعتاد الذى يستخدم فى المنازل وهو فى الولايات المتحدة يبلغ 120 V .

يوجد فى كثير من المنازل خطوط ذات 240 V أيضا وذلك لأن الأجهزة المنزلية الضخمة مثل المكواة ، المجففات ، المواقد ، الخ ، تدار من خطوط 240 V بدلا من 120 V والسبب فى هذا هو نفسه الذى من أجله تلجأ الشركات الى استعمال الجهد العالى . عليك أن تشرح لماذا كان تشغيل هذه الأجهزة ذات الاستهلاك الضخم للطاقة من خط 240V بدلا من 120V أكثر وفرا

ملخص

حين يقوم مصدر للتيار المستمر بشحن مكثف C خلال مقاوم مقاوم R فإن التيار يضمحل أسيا . هناك زمن مميز RC يسمى الثابت الزمنى وهو ذو أهمية ، فهو يقيس الزمن الذى يستغرقه المكثف لكى يشحن (أو يفرغ) بنسبة 63 فى المائة تقريبا . وخلال نفس هذا الوقت تنهبط تيارات الشحن والتفريغ إلى مايقرب من 37 فى المائة من قيمها الأصلية .

القيمة المتوسطة لأى تيار أو جهد من النوع الجيبى تساوى صفرا . تقرأ أجهزة قياس التيار المتردد العادية $i_0/\sqrt{2}$ و $v_0/\sqrt{2}$ حيث i_0 ، v_0 هى القيم الذروية . وتمثل قراءات تلك الأجهزة بالرمزين I ، V ، اللذين يطلق عليهما القيم الفعالة أو قيم (rms) . حين يطبق جهد متردد V عبر مقاوم R فإن العلاقة $V = IR$ تكون قائمة . بالنسبة لمكثف يوجد عبر طرفيه جهد متردد ذو تردد f فإن $V = IX_C$ حيث $X_C = 1/2\pi fC$. فى حالة ملف الحثية L وبين طرفيه جهد متردد يكون لدينا $V = IX_L$ حيث $X_L = 2\pi fL$. تسمى الكميات X_C ، X_L المفاعلة السعوية والمفاعلة الحثية .

تنطبق العلاقة $V = IZ$ فى دائرة على التوالى تحتوى على مصدر للتيار المتردد مع ملف حثية ، ومكثف ومقاومة ، وتكون معاوقة الدائرة Z مساوية $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

لاستهلك المكثف النقى أو ملف الحثية النقى فى المتوسط أية قدرة . ويكون استهلاك الطاقة مقصورا على المقاومات حيث يكون فقد الطاقة هو I^2R فى دائرة على التوالى تحتوى على L ، C ، R فإن فقد الطاقة يكون $VI \cos \theta$ حيث V هو الجهد المطبق ، أما الكمية $\cos \theta$ فتسمى عامل القدرة . الزاوية θ تعطى بالعلاقة $\tan \theta = (X_L - X_C)/R$

ترن دائرة LC عند تردد يكون فيه $X_L = X_C$ ، وعند تردد الرنين $f_0 = (1/2\pi) \sqrt{1/LC}$ يصبح التيار كبيرا جدا . وكلما قلت مقاومة الدائرة كلما زاد التيار عند الرنين .

تتكون المحولات من ملفين (أو أكثر) . يقوم التدفق الناشئ من الملف الابتدائى بربط الملف الثانوى ، يربط الجهد فى الابتدائى والجهد فى الثانوى بعدد العرى فى كل من الملفين حسب العلاقة $V_g/V_p = N_g/N_p$ الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذه الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ - أن ترسم منحنيات التيار والشحنة لدائرة RC خلال الشحن وأن تعرف الثابت الزمنى للدائرة وتربط بينه وبين المنحنيات . أن تشرح معنى الثابت الزمنى لتفريغ المكثف خلال مقاوم .

٢ - أن ترسم منحنى نموذجيا لجهد أو تيار مترددين . وأن توضح على الرسم القيم المتوسطة ، الذروية ، (rms) والفعالة . أن تربط بين قيمة (rms) والقيمة الذروية بطريقة كمية .

٣ - أن تذكر صورة قانون أوم التى تنطبق على جهد متردد مطبق على مقاوم . أن ترسم على نفس الرسم البياني منحنيات التيار والجهد وأن تحسب متوسط فقد الطاقة فى المقاوم إذا توفرت لديك البيانات الكافية .

٤ - أن تشرح لماذا كان أثر معاوقة المكثف أكبر عند الترددات المنخفضة عنه عند المرتفعة . أن تستعمل العلاقة $V = IX_C$ فى مواقف بسيطة .

٥ - أن ترسم منحنيات التيار والجهد لمكثف متصل عبر مصدر قدرة مترددة . أن تذكر متوسط فقد الطاقة فى المكثف .

٦ - أن تشرح لماذا كان أثر معاوقة ملف الحثية أكبر عند الترددات المرتفعة عنه عند المنخفضة . أن تستعمل العلاقة $V = IX_L$ فى مواقف بسيطة .

٧ - أن ترسم منحنيات التيار والجهد لملف حثية متصل عبر مصدر للتيار المتردد . أن تذكر متوسط فقد الطاقة فى الملف .

٨ - أن تستعمل العلاقة $V = IZ$ فى مسائل بسيطة تتضمن دوائر RCL على التوالي .

٩ - أن تشرح - باستخدام $V = IZ$ لماذا يوجد تردد رنين لدائرة LC . أن توضح كيف تجد تردد الرنين .

١٠ - أن تشرح ماهو المحول وأن تذكر العلاقة التى تعطى النسبة V_g/V_p . أن تصف عدة استخدامات للمحولات .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

الثابت الزمنى RC

التيار أو الجهد المتردد

القيم المتوسطة (rms) والفعالة

$$I = i_0 / \sqrt{2}; V = v_0 / \sqrt{2}$$

$$P = I^2 R; P = VI \cos \theta$$

المقاومة ، المفاعلة السعوية ، المفاعلة الحثية

المعاوقة

$$X_L = X_C \text{ عند الرنين ، تردد الرنين}$$

محولات الخفض والرفع

أسئلة وتكمينات

١ - أعطيت مكثفا $2\mu F$ ، خلية جافة ، جهاز فائق الحساسية ومتعدد الاستعمالات لقياس التيار . كيف تستخدم هذه الأشياء لقياس

مقاومة مقاوم يظن أنه يقارب $10^8 \Omega$ ؟ هل يمكنك القيام بنفس القياسات باستخدام فلتير عادى بدلا من جهاز قياس التيار ؟

٢ - يستعمل فى بعض الأماكن جهد متردد ذو تردد منخفض (أقل كثيرا من 60 cps) . ويمكن ملاحظة أن الأضواء الكهربائية ترتعش بسرعة حين تعمل عند هذا الجهد . اشرح سبب هذا الارتعاش .

٣ - اذكر لآى من هذه الاستخدامات يكون الجهد المتردد والجهد المستمر مقبولين بنفس الدرجة : مصابيح الإضاءة المتوهجة ، الموقد الكهربائى ، التحليل الكهربى ، جهاز التليفزيون ، الضوء الفلورى ، الساعة الكهربائية .

٤ - اعقد تشابها بين تذبذب كتلة m على زنبرك وتذبذب دائرة LC . أى كميات النظام الميكانيكى تناظر L ، C فى النظام الكهربائى ؟ اشرح .

٥ - قارن بين معادلة تردد الرنين لكتلة تتذبذب عند طرف زنبرك مع معادلة الرنين لدائرة LC . ماهى أوجه الشبه التى يمكن ملاحظتها بين المعادلتين ؟

٦ - يتصل فوتمتر (dc) عبر طرفى مذبذب متغير التردد . ماهو سلوك الفوتمتر عند تغير تردد الجهد المذبذب من 0.01 إلى 100cps . اشرح .

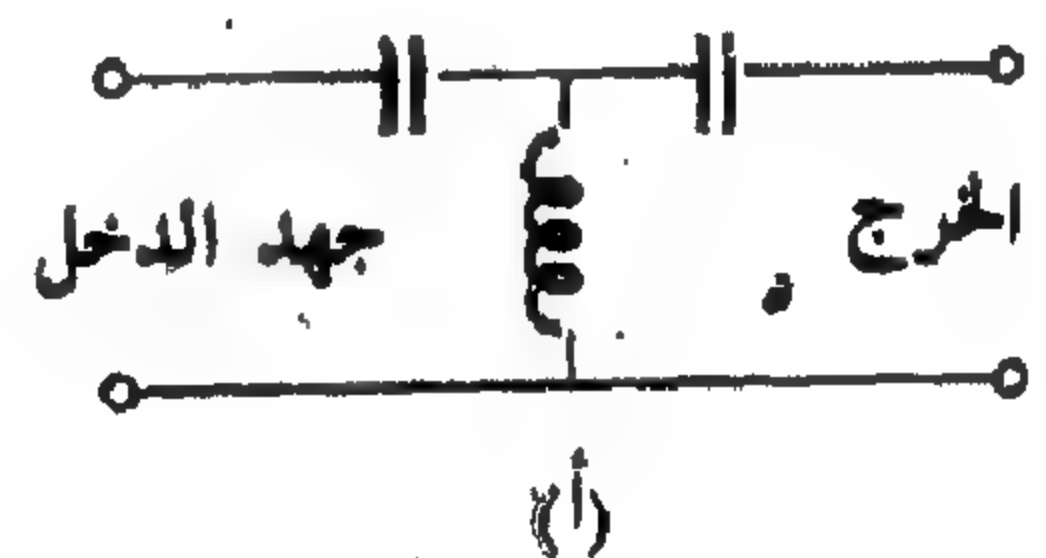
٧ - لماذا لايعتبر من الحكمة استخدام خط 1000 V للتيار المتردد فى المنزل على الرغم من أن هذا أكثر اقتصادا من حيث كمية الأسلاك ؟

٨ - لو أمكن عن طريق السحر إيجاد وعاءين يمتلئ أحدهما بالشحنات الموجبة والآخر بالسالبة ، وأنه يمكنك أن تعرف كميات صغيرة حسبما تشاء . كيف يمكنك استخدام هذه الشحنات لكى تنشئ ذبذبات كبيرة فى دائرة LC ؟ لو أمكنك أن تعرف كمية محدودة فقط دفعة واحدة ، فما هو تأثير الزيادة البطيئة فى مقاومة الدائرة السابقة ؟

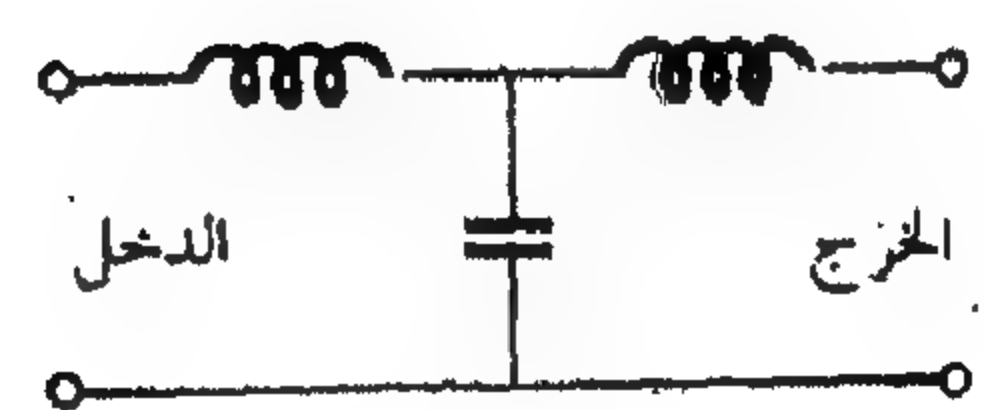
٩ - نشر هذا التصريح فى صحيفة يومية : « حذر مدير الصحة بالمدينة ج . ر . سميت من أن الأجهزة الكهربائية المنزلية يمكن أن تسبب إصابات قاتلة . وقد جاء هذا التعليق اثر وفاة صبي يبلغ ١٨ عاما تعرض للصعق حين أدخل عرضا شوكة طعام داخل محمصة الخبز الكهربائية . وصرح د . سميت أنه حتى الأشخاص البالغين قد يقتلون بمثل هذه الصدمات الكهربائية . وأضاف أن التيار العادى فى المنازل يبلغ 110 volts ولكن الجهد يزداد حين يكون التيار « مؤرضا » . كيف كان يجب أن تصاغ الجملة الأخيرة .

١٠ - تسمى الدوائر المبينة فى الشكل م ٢١ - ١ مرشحات . حين يدخل جهد متردد إلى إحدى هذه الدوائر فإن جهد الخرج المتردد يعتمد على تردد الجهد المذبذب . تقوم إحدى هذه الدوائر بالسماح لجهد الدخل بالمرور دون أية اضطرابات فيه إذا كان تردد الذبذبة عالياً . أما الأخرى فتسمح بمرور الجهود ذات التردد المنخفض فقط . اشرح حقيقة الأمور فى كل حالة .

١١ - يوضح الشكل م ٢١ - ٢ نمودجا لخطط بياني كهربائي لعمل القلب وهو عبارة عن فرق الجهد بين الرجل اليسرى والذراع اليسرى . اوجد من الرسم قيمة الجهد المتوسط ، جهد (rms) والعلاقة بين الجهد الذرى وجهد (rms) لهذا الشكل الموجى . لم لايعرف جلفانومتر بسيط حين يتصل بالنقطتين المذكورتين على جسدك ؟ (ق) .

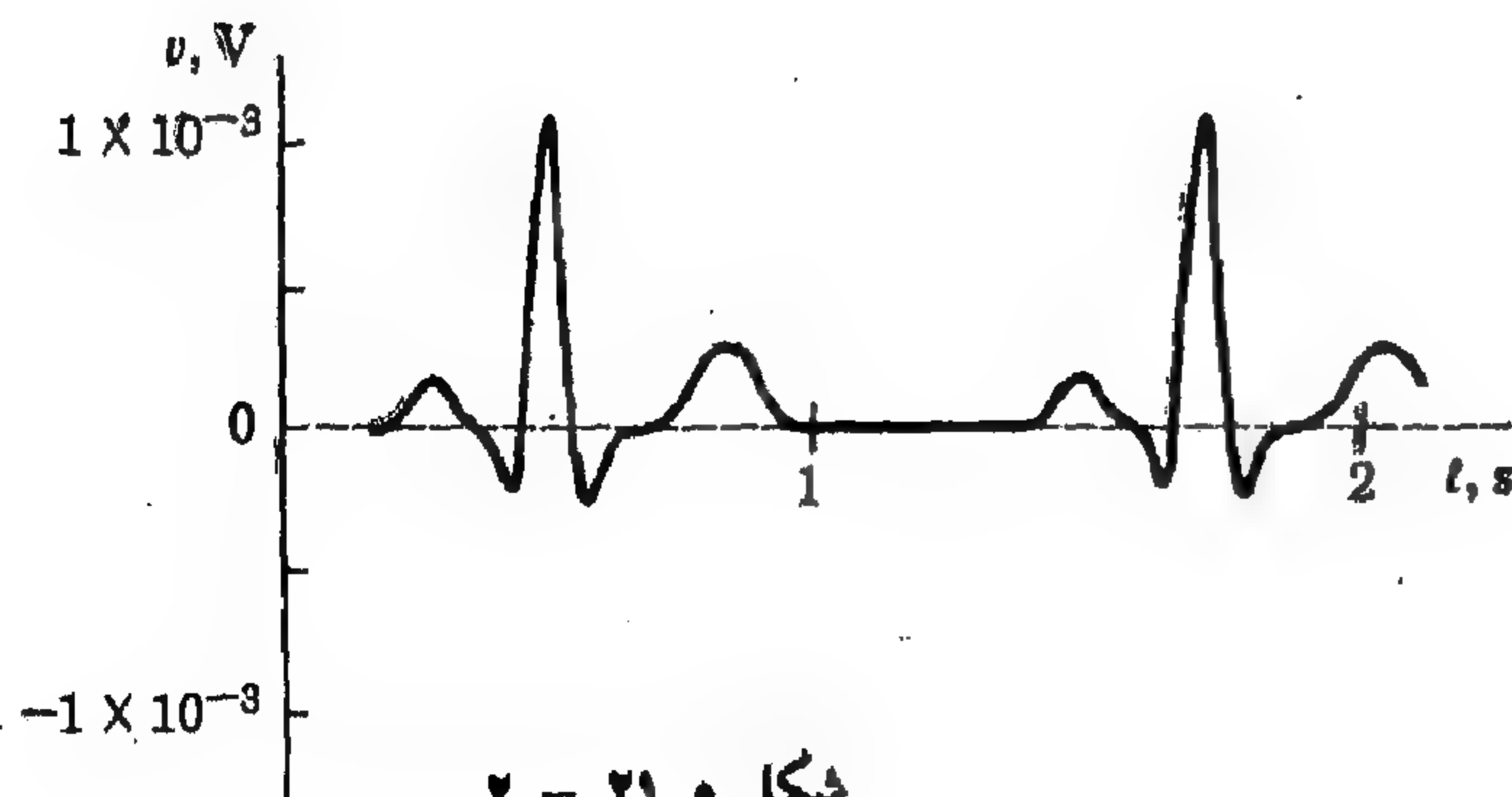


(أ)



(ب)

شكل م ٢١ - ١



شكل م ٢١ - ٢

مسائل :

- ١ - تتكون دائرة توال من بطارية $60.0V$ ومقاوم $2 \times 10^4 \Omega$ ، مكثف $4.0 \mu F$ ومفتاح مفتوح وكان المكثف في البداية غير مشحون ، ثم أغلق المفتاح . (أ) ماهو الثابت الزمني للدائرة ؟ (ب) ماهو الزمن اللازم بالتقريب لكي يصبح المكثف مشحونا بمقدار الثلثين ؟ (ج) مامقدار الشحنة التي تسرى إليه خلال الزمن المحسوب في (ب) ؟ (د) مامقدار التيار المتوسط بالتقريب والذي سري إلى المكثف خلال تلك الفترة الزمنية ؟
- ٢ - افترض أنك قمت بقياس مقاومة جسدك فيما بين يديك بواسطة أوميتر ووجدتها تبلغ $62,000 \Omega$ ، ثم شحن مكثف $12.0 \mu F$ الى جهد قدره $9V$ ثم فصل طرفاه . لو أنك قبضت على طرفي المكثف بيديك ، (أ) فما هو الثابت الزمني للدائرة المحتوية على جسدك والمكثف ؟ (ب) كم يكون فرق الجهد تقريبا بعد $\frac{2}{3}s$ بين طرفي المكثف ؟ (ج) كم كانت الشحنة على المكثف حين كان فرق الجهد عبره هو $9V$ ؟ (د) كم كان بالتقريب التيار الذي سري خلال جسدك في هذه الفترة $\frac{2}{3}s$ ؟
- ٣ - يقرأ أوميتر عادي $2.0A$ حين يوصل في دائرة تيار متردد . ماهو التيار الذي يسري فعلا في الدائرة ؟
- ٤ - يقرأ فولتميتر عمادي $120 V$ حين يكون متصلا عبر خط التيار المتردد بالمنزل . ماهو فرق الجهد الأقصى بين الخطوط ؟
- ٥ - يمر تيار معطى بالعلاقة $i = 5 \sin 360t$ في خلال مقاوم 20Ω . مامقدار القدرة التي تبدد في المقاوم ؟
- ٦ - طبق جهد مقداره $v = 60 \cos 360t$ عبر مقاوم قيمته 20Ω . مامقدار القدرة التي تبدد في المقاوم ؟
- ٧ - مصدر جهد يعطى $120V$ (rms) بتردد قدره $60Hz$. وصل هذا المصدر مع مكثف قدره $10 \mu F$ مباشرة . مامقدار تيار (rms) في الدائرة ؟
- ٨ - مامعامل تغير التيار في دائرة مكثف إذا تغير تردد مصدر الجهد فصار أكبر $10,000$ مرة دون أن يتغير الجهد ؟ (لا تحتوي الدائرة إلا على المكثف ومصدر الجهد) .
- ٩ - يتصل مصدر جهد متردد عبر ملف محاث $0.5H$ وعديم المقاومة مباشرة . ماهو مقدار الجهد الذي يؤدي إلى مرور تيار قدره $2A$ إذا كان التردد (أ) $60 Hz$ ، (ب) $6 \times 10^5 Hz$ ؟
- ١٠ - يتصل جهد مقداره $100V$ وتردده $180/\pi$ cps عبر مقاوم 20Ω . اوجد التيار المسحوب من مصدر الجهد . (ب) أعد (أ) إذا كان التردد $18,000/\pi$ cps (ج) مامقدار القدرة المتبددة في المقاوم كل مرة ؟
- ١١ - كرر المسألة رقم (١٠) إذا حل مكثف $1.00 \mu F$ محل المقاومة
- ١٢ - كرر المسألة رقم (١٠) إذا حل ملف محاث $0.10H$ محل المقاومة .
- ١٣ - يتصل ملف محاث $0.10 H$ ومقاومته 36Ω عبر مصدر يعطى $120 V$ وتردده $180/\pi$ cps . مامقدار التيار الذي يسحب من المصدر ؟
- ١٤ - ملف محاث قيمته $0.10 H$ يسحب تيارا قدره $2.0A$ حين يوصل عبر مصدر يعطى جهدا $100V$ وتردده $60 Hz$. ماهي مقاومة الملف ؟
- ١٥ - (أ) ماهي قيمة المكثف الواجب توصيله مع ملف $0.10 H$ إذا كان للمجموعة أن ترن عند تردد مقداره $60 Hz$ ؟ (ب) ماهي قيمة ملف المحاث الذي يحدث رنيننا عند هذا التردد إذا اتعمل بمكثف مقداره $1 \mu F$ ؟
- ١٦ - وصل مكثف وملف محاث على التوالي عبر مصدر $12V$ ذي تردد $60 Hz$. كانت محاث الملف $\frac{1}{3} H$ ومقاومته 20Ω أما سعة المكثف فكانت $1 \mu F$ (أ) اوجد التيار المار في الدائرة . (ب) كرر لتردد يبلغ $6000 Hz$
- ١٧ - * (أ) ماهي قيمة ملف المحاث الواجب توصيله على التوالي مع مكثف $10 \mu F$ ، مقاوم 20 ومصدر $60-Hz$ ، $100-V$ إذا كان التيار المار في * الدائرة $4A$ (ب) كرر لتردد يبلغ $6000 Hz$

١٨ - وصلت العناصر التالية على التوالي عبر مصدر للجهد 100 V ، $200/\pi\text{-cps}$ ، $R=10.0\ \Omega$ ، $C=2.50\ \mu\text{F}$ ، $L=2.5\ \text{H}$ (أ) ما مقدار التيار المسحوب من المصدر عندما تكون كل العناصر متصلة على التوالي عبره ، (ب) ما هي القدرة المتبددة في الدائرة ؟ (ج) ما مقدار عامل القدرة ؟

١٩ - كرر المسألة (١٨) إذا تغيرت قيمة L فصارت 5.00H

٢٠ - * تم لف ملف كبير من السلك على قطعة اسطوانية من الخشب . باستخدام أجهزة القياس المناسبة وجد أن مصدر للتيار المستمر 10V ينتج تياراً قدره 0.50A خلال الملف بينما يجعل مصدر آخر للتيار المتردد $70\ \text{V}$ ، $60\ \text{Hz}$ تياراً يمر في الملف مقداره 2.00A ما هي محاطة الملف ؟

٢١ - * يسحب ملف محاطة تياراً قدره 0.60A عندما يتصل عبر بطارية $12\ \text{V}$ بينما يسحب 3A حين يتصل عبر مصدر $120\ \text{V}$ ، $60\ \text{Hz}$ اوجد (أ) القدرة المسحوبة من مصدر التيار المتردد و (ب) محاطة الملف .

٢٢ - * يتصل ملف $60\ \text{mH}$ عبر مصدر $120\ \text{V}$ ، $60\ \text{Hz}$ ما هو مقدار الطاقة التي يبددها ؟

٢٣ - يريد أحد أصحاب المصانع أن يقتنى وحدة تسخين كهربائية لموقده $2000\ \text{W}$ بالإضافة إلى ثلاث وحدات $1000\ \text{W}$ هل من الممكن توصيل هذا الموقد بخط منزلي $120\ \text{A}$ ، $30\ \text{A}$ أم يجب أن يصمم ليعمل على $240\ \text{V}$ ؟

٢٤ - تحتاج سخانات بعض الصمامات المفرغة إلى جهد مقداره 6V كم يجب أن تكون نسبة عدد لفات الابتدائي إلى لفات الثانوي لـ محول يستعمل لتشغيل الصمام من خط $120\ \text{V}$ ؟ لو أن المحول وصل - بطريقة غير مقصودة - بالعكس فكم سيكون الخرج عند طرفي الملف الثانوي ؟

٢٥ - تحتاج لافتات النيون إلى جهد يبلغ $12,000\ \text{V}$ لتشغيلها . كم يجب أن تكون النسبة N_s/N_p لمحول يسمح لهذه اللافتات بالعمل من خط $120\ \text{V}$ ؟

الفصل الثانى والعشرون

الالكترونيات والأمواج الكهرمغناطيسية

رأينا فى الفصل السابق أن تذبذب الشحنات بتردد محدد يمكن أن يحدث فى أنظمة كهربائية زنانة تتكون من سعة ومحث . ومثل تلك الدوائر تستخدم على نطاق واسع فى النيبطات الالكترونية اللازمة لتوليد واستقبال الأمواج اللاسلكية .

سنناقش فى هذا الفصل أساسيات بعض من هذه النيبطات وسنبحث علاوة على ذلك كيف تتولد الأمواج اللاسلكية وكيف تستقبل بواسطة هذه النيبطات . وسنجد أن هذه الأمواج ليست الا جزءا صغيرا من تشكيلة ضخمة من الأمواج تسمى الأمواج الكهرمغناطيسية . سنبحث فى طبيعة الاشعاع الكهرمغناطيسى وسنجد أن هذا الاشعاع يتضمن مجموعة متباعدة من أنماط الحركة الموجية مثل موجات : اللاسلكى ، الاشعاع الحرارى ، الضوء وأشعة اكس .

٢٢ - ١ الابتعاث الـرميوني

هناك تصنيفان رئيسيان للنبيطات الالكترونية . يشمل أولهما تلك النبيطات التي تستخدم فيها الصمامات المفرغة بينما يحيط الثاني بتلك الأنظمة الالكترونية التي تستخدم فيها نبيطات الحالة الصلبة مثل الترانزستور . ومن الطبيعي أن يكون هناك العديد من الأجهزة الالكترونية التي تستخدم كلا من الصمامات المفرغة ونبيطات الحالة الصلبة . سنقوم الآن بتعلم شيء عن الابتعاث الـرميوني ، وهو ظاهرة أساسية لجميع الصمامات المفرغة .

يمكننا بالتقريب الأولى اعتبار الكترونات التكافؤ في معدن ما كعلى أنها حرة الحركة في أى اتجاه داخل المعدن . ولذا فهي تسلك في كثير من النواحي سلوك جزيئات غازية داخل وعاء . ففي حالة المعدن يكون سطح المعدن هو الوعاء ومن الممكن تعلم الكثير عن سلوك الكترونات التكافؤ في معدن ما اذا ما نظرنا اليهم على أنهم غاز الكتروني ، أى غاز مكون من الكترونات بدلا من جزيئات . سنستخدم مفهوم الغاز الالكتروني لنتناقش ظاهرة الابتعاث الـرميوني وتحرر الالكترونات من معدن محمي للدرجة الـبيضاض .

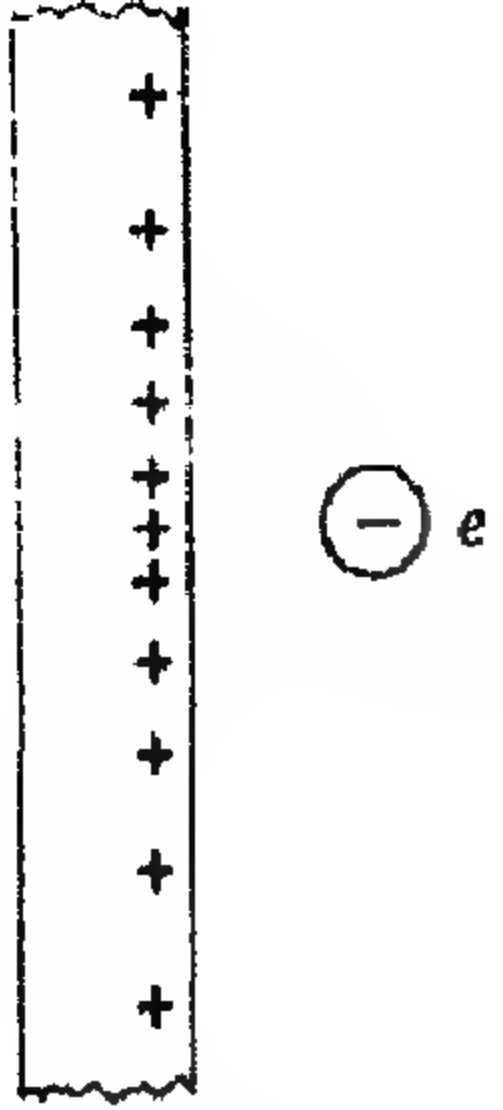
يمكننا حساب طاقة الحركة لالكترونات التكافؤ داخل معدن ما بسهولة ، فمن الفصل العاشر نذكر أن قانون الغازات يمكن أن يكتب على صورتين مختلفتين ،

$$PV = \nu_0 kT \quad \text{و} \quad PV = \frac{2}{3} \nu_0 \left(\frac{1}{2} m_0 v^2 \right)$$

حيث P هي ضغط ν_0 من جزيئات الغاز التي تبلغ كتلة كل منها m_0 محصورة في حجم قدره V عند درجة حرارة مطلقة T الكمية $\frac{1}{2} m_0 v^2$ هي طاقة حركة جزيء غازي ، k ثابت بولتزمان وهو يساوي $1.38 \times 10^{-23} \text{ j/k}$. بمساواة هاتين المعادلتين ينتج أن :

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{3}{2} kT$$

تدل هذه المعادلة على أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزيء أى غاز مثالي موجود داخل أى صندوق هو $\frac{3}{2} kT$ تماما . وهذا الأمر يجب أن يكون صحيحا أيضا بالنسبة لغاز الكترونات التكافؤ داخل كتلة من المعدن بشرط أن تكون هذه الالكترونات قادرة على أن تطفو بحرية داخل المعدن . اذا ما وصلنا الى هذا الحد من التقريب فان لدينا تلك النتيجة الهامة وهي أن كل الكترون تكافؤ في معدن ماله متوسط طاقة حركة يساوي $\frac{3}{2} kT$ وبالطبع سيكون لدى بعض هذه الالكترونات



شكل ٢٢ - ١

على الالكترون التغلب على
جذب الشحنات المستحثة
على سطح المعدن اذا رغب
في الهرب من المعدن

طاقة أكبر من هذه والبعض الآخر أقل ولكننا سنستعمل هذا المقدار كأساس للمناقشة* .

هل هناك أية امكانية لهروب الالكترون من المعدن ؟ للإجابة على هذا السؤال يجب أن نعرف ما الذى يمسك بالالكترونات داخل المعدن . الجانب الأكبر من القوة التى تمسك بالالكترونات فى المعدن ذات أصل الكتروستاتى صرف . لنعتبر ما الذى يمكن أن يحدث اذا حاول الكترون أن يغادر كتلة الى خارجها . يقوم الالكترون السالب بحث شحنة موجبة على سطح المعدن بمجرد وجوده خارج السطح المعدنى كما هو مبين فى الشكل ٢٢ - ١ . تقوم الشحنة الموجبة بدورها بالتأثير بقوة جذب على الالكترون محاولة اعادته مرة أخرى الى المعدن .

ولن يكون الالكترون قادرا على الهرب مالم يكن لديه من طاقة الحركة ما يكفى ليتغلب على هذا الجذب .

يتضح لنا من هذه الاعتبارات أن قدرا معيناً من الشغل ضرورى لانتزاع الالكترون من المعدن ، ومالم يكن لدى الالكترون ما يكفى من طاقة الحركة لبذل هذا الشغل ، فلن يهرب . تسمى كمية الطاقة اللازمة للتغلب على القوى الممسكة بالالكترون داخل المعدن وانتزاع الالكترون ليصبح طليقا دالة الشغل للمعدن . يجب الإشارة هنا الى أن الطاقة التى تحدثنا عنها هى جزء فقط من طاقة دالة الشغل أما الطاقات الأخرى المتضمنة فمن الصعب جدا حسابها ولن نتمكن من مناقشتها هنا .

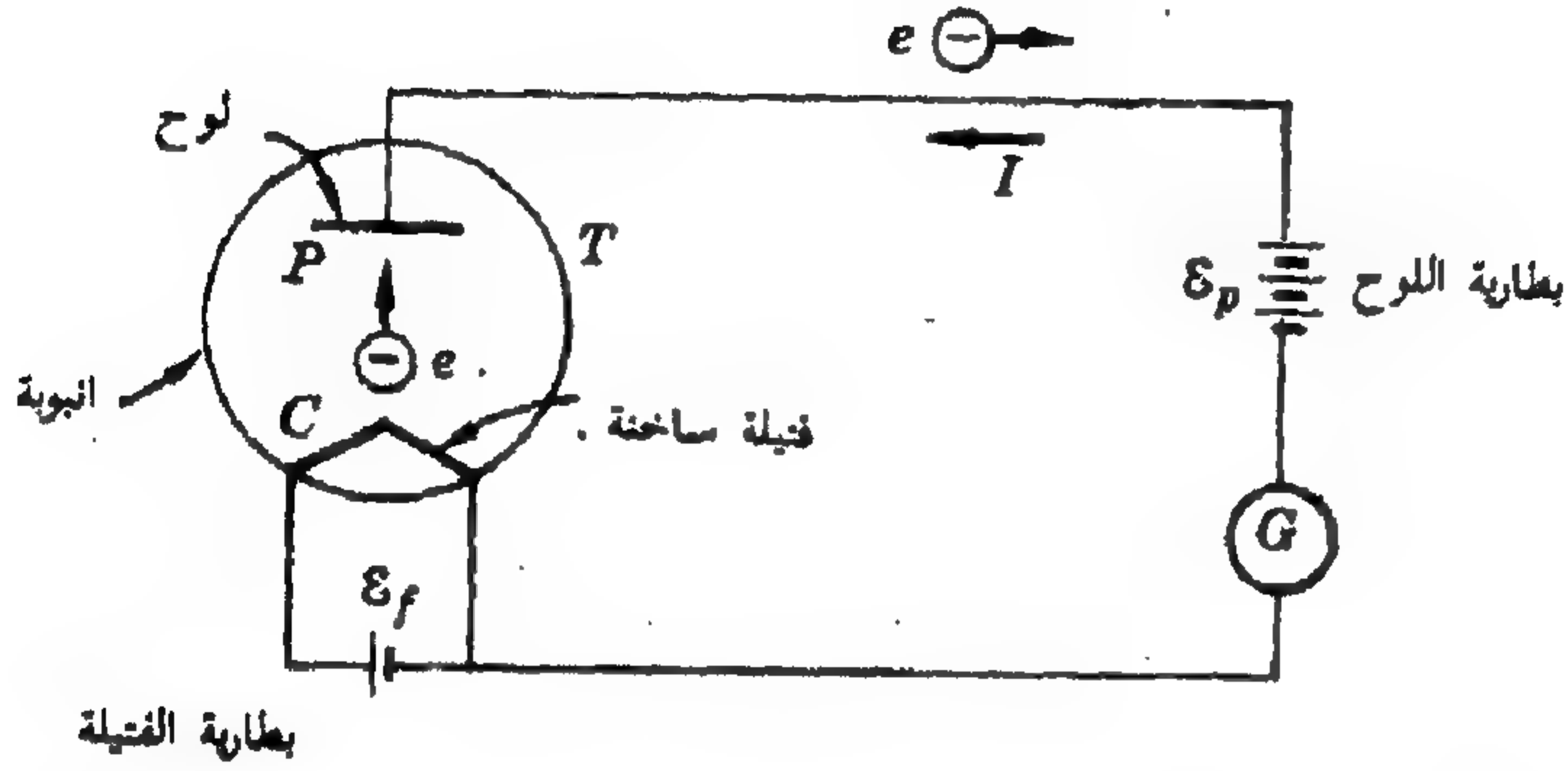
فى ضوء ما سبقت مناقشته نرى أن الالكترون يستطيع الهرب من معدن ما بشرط أن تكون لديه طاقة حركة كافية . وبما أن متوسط طاقة حركة الالكترون يتناسب مع درجة حرارة المعدن تناسباً طردياً ، فإن من الواضح أنه يجب تسخين المعدن قبل أن يتمكن الالكترون من الهرب . ولمعظم المعادن ، لا يتمكن عدد محسوس من الالكترونات من الهرب من سطح المعدن مالم يسخن الأخير لدرجة الاحمرار .

٢٢ - ٢ الصمام الثنائى والتقويم

يعتبر مبدأ الابتعاث الترميوى أساسياً لعمل الصمام الثنائى ، وهو أبسط طراز للصمامات المفرغة . يتكون هذا الصمام من عنصرين أساسيين موجودين داخل

* عند درجات الحرارة المنخفضة والطاقات المنخفضة للالكترون تصبح تأثيرات نظرية الكم هامة ويصبح تقرب الغاز الالكتروني خاطئاً . على أنه عند درجات الحرارة المرتفعة وطاقات الالكترونات المرتفعة فإن هذا التقرب يكون صالحاً للاستعمال . بمعنى هنا بالالكترونات ذات الطاقة العالية ولذا يكون تقرب الغاز الالكتروني صالحاً .

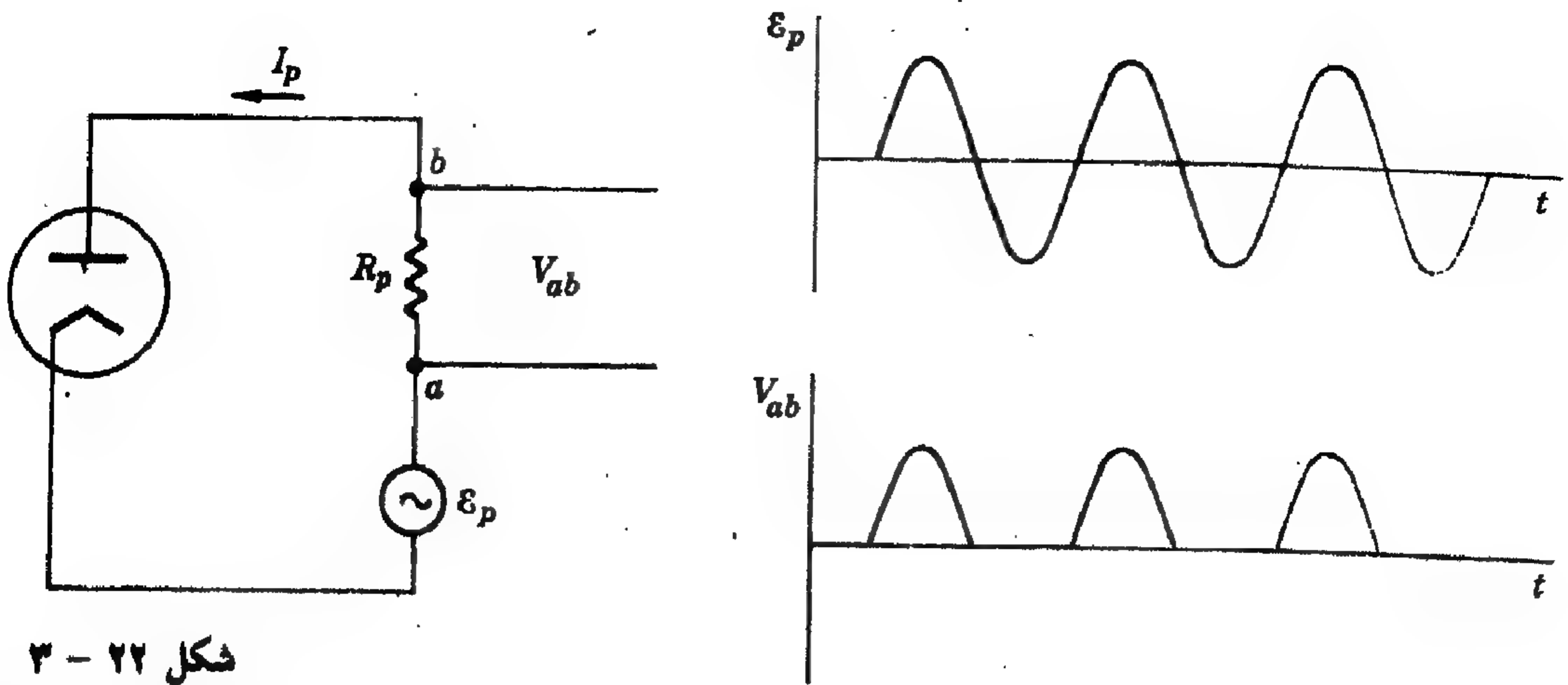
انبوبة زجاجية مفرغة T كما هو مرسوم في الشكل ٢٢ - ٢ . تستخدم قطعة من المعدن الساخن ، المهبط ، أو الفتيلة ، كمصدر للإلكترونات . وأحيانا يكون المهبط مجرد سلك دقيق يسرى خلاله تيار فيسخنه لدرجة الاحمرار وهذا ما يصوره الشكل . يكون جهد المهبط أو الفتيلة E_f في حدود 5v في التطبيقات العملية . وتستخدم بعض الصمامات الثنائية مهبطا ذا تسخين غير مباشر وفي هذه الحالة لن يكون هناك E_f المذكورة في الشكل ٢٢ - ٢ وبدلا منها يكون هناك عنصر تسخين منفصل ، وغير متصل كهربيا مع C ، يقوم بتسخين المهبط .



شكل ٢٢ - ٢
تبحث الإلكترونات من
المهبط الساخن C وتنقل
خلال الصمام المفرغ T
لتصل إلى اللوح الموجب P

في كلتا الحالتين يتم تسخين المهبط بدرجة كافية تسمح بحدوث ابتعاث ترمبوني محسوس . أما العنصر الآخر داخل الصمام وهو لوح معدني غير مسخن فالفرض منه جمع الإلكترونات المبتعثة من المهبط الساخن ، وحيث أن الصمام مفرغ فإن الإلكترونات الخارجة من الفتيلة ستتحرك بحرية إلى أن تصطدم مع جدران الصمام أو مع اللوح . ولكن نظرا لوجود فرق للجهد بين الفتيلة واللوح والذي توفره بطارية اللوح E_p فإن الإلكترونات المبتعثة من المهبط تنجذب بواسطة اللوح . تكون قيمة E_p في معظم الصمامات حوالي 200v أو أكثر وتجميع كل الإلكترونات التي يبعثها المهبط تقريبا بواسطة اللوح .

يستخدم الصمام الثنائي على نطاق واسع نظرا لأثره التقويمي ، فكما أشرنا في الفصل السابق فإنه من الأكثر ملائمة - من الناحية العملية - إنتاج ونقل التيار المتردد بدلا من التيار المستمر . على أننا نحتاج التيار المستمر في عديد من الأغراض مثل شحن البطاريات ، الطلاء الكهربائي وبخاصة للنبيطات الإلكترونية . يمكن الحصول على التيار المستمر من التيار المتردد باستعمال صمام ثنائي كما هو مبين في الشكل ٢٢ - ٣ ، حيث استبدل ببطارية اللوح الجهد المتردد المراد تقويمة .



شكل ٢٢ - ٣

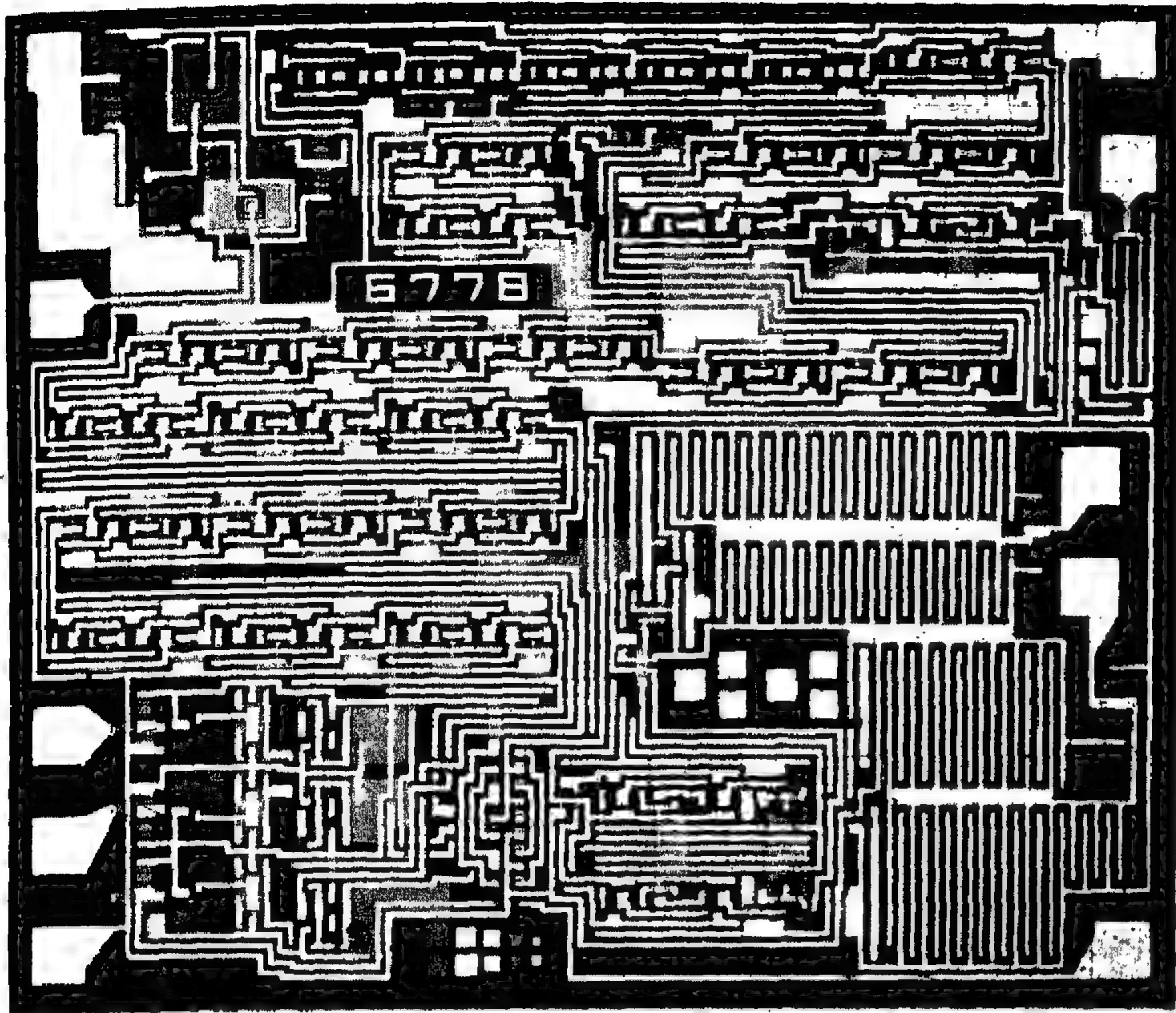
على الرغم من أن الجهد \mathcal{E}_p متردد كما هو موضح إلا أن دائرة الصمام الثنائي تنتج جهداً مقوماً V_{ab} عبر مقاوم الحمل

يتناوب الجهد \mathcal{E}_p كما هو واضح في الشكل ٢٢ - ٣ ، فحين يكون \mathcal{E}_p موجبا يكون اللوح موجبا والفتيلة سالبة ، وتمر الالكترونات التي تبعثها الفتيلة الساخنة الى اللوح بما ينشئ تيار اللوح I_p . ولما كان هذا التيار يمر خلال R_p أو مقاوم الحمل ، أو مقاوم اللوح فان فرقا للجهد ينشأ بين النقطتين a و b وهو V_{ab} . على أنه حين تنعكس \mathcal{E}_p ويصير اللوح سالبا بالنسبة للفتيلة فان الالكترونات القادمة من الفتيلة ستتنافر مع اللوح وتنخفض I_p الى الصفر ، أي أن V_{ab} سيكون صفرا حين تكون \mathcal{E}_p سالبة . يوضح الشكل ٢٢ - ٣ أيضا تغير V_{ab} ومن الواضح أن V_{ab} لا يصير سالبا أبدا وهذا نكون قد نجحنا في تحويل جهد متردد \mathcal{E}_p الى جهد مستمر .

٢٢ - ٣ الصمام الثنائي شبه الموصل

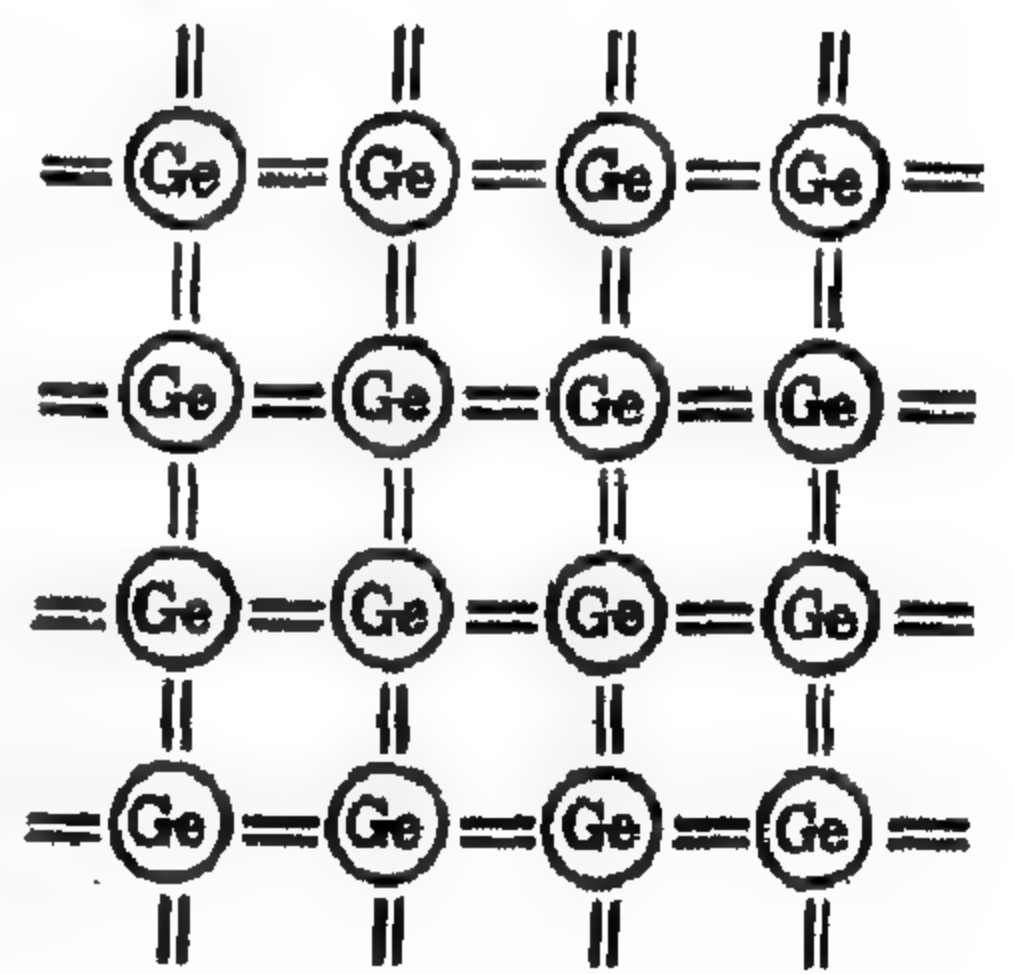
من المحتمل أن تكون على علم بأن المزيد من الأجهزة الالكترونية قد صارت تستخدم نبيطات شبه موصلة مثل الترانزستورات والصمامات الثنائية بدلا من الصمامات المفرغة . فهذه النبيطات عبارة عن قطع صغيرة من مواد صلبة متبلرة لا تحتاج الى أية حرارة لتشغيلها . وحيث أن الفتيلة كما هي لا لزوم لها فان مقتضيات الدوائر والقدرة أقل من حالة نبيطات الصمامات المفرغة العادية . علاوة على ذلك ، يمكن جعل هذه النبيطات صغيرة جدا وبذ يتوفر حيز كبير باستخدامها ويمكنك رؤية الدائرة المصغرة المبينة في الشكل ٢٢ - ٤ على سبيل المثال .

تشكل ذرات السيليكون والجرمانيوم أساسا لكثير من نبيطات أشباه الموصلات . والسيليكون والجرمانيوم النقيين يعتبران غير مرصلين وكلتا الذرتين لها أربعة الكترونات تكافؤ أو خارجية وعلى كل منهما أن تفقد هذه الالكترونات الأربعة أو تكتسب أربعة



شكل ٢٢ - ٤
تحتوي دائرة التوقيت المصغرة
هذه على الالكترونيات
الاساسية لساعة كهربائية
وعلى الرغم من أنها تحتوي
على عدة مئات من الاجزاء
الالكترونية الا أن أبعادها
التحزيمية تبلغ حوالى
4x5x2 mm (مجملة
من RCA)

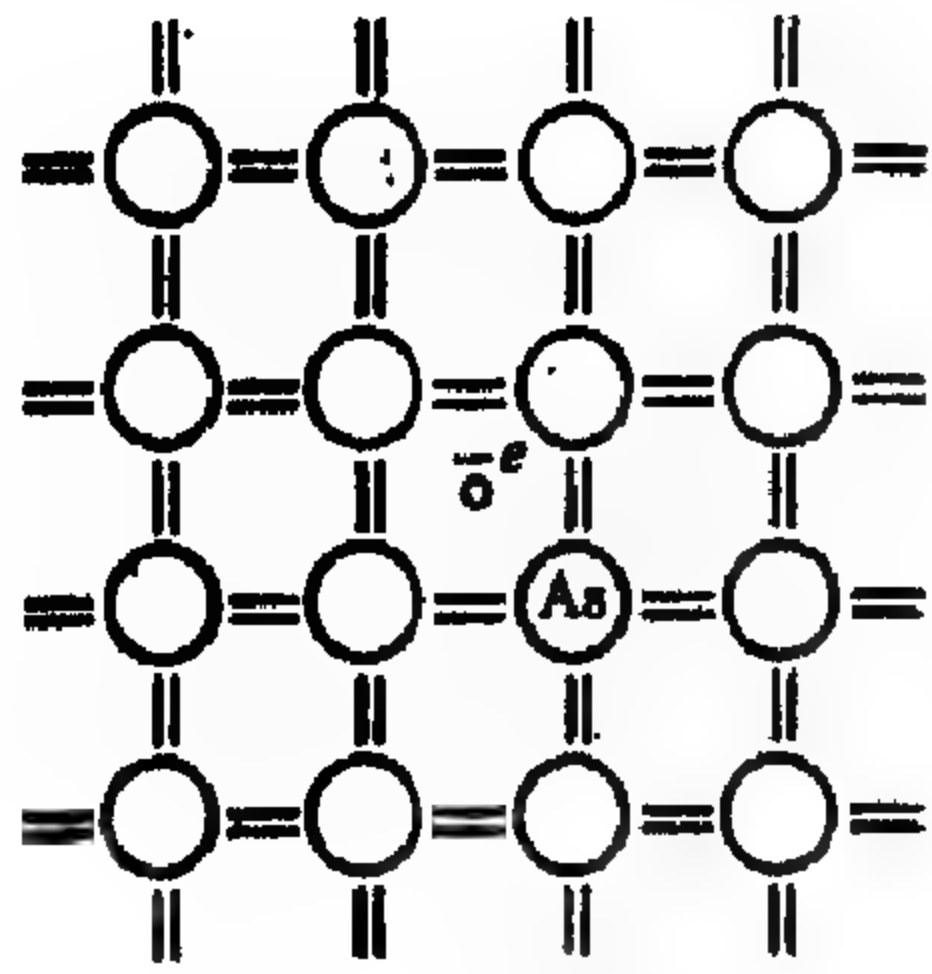
الالكترونات أخرى حتى يكون بها قشرات الكترونية مكتملة ، ومن ثم تتحد هذه الذرات مع الذرات الأخرى بحيث تفقد أو تكسب أربعة الكترونات بشكل فعال .
وهي تقوم بهذا في حالة الجرمانيوم والسيليكون البلوريين عن طريق انشاء ترابطات اسهامية مع جيرانها . ومعنى هذا أن كل ذرة تشارك في الكتروناتها الأربعة الخارجية مع أربعة ذرات أخرى وبذا يكتفى الجميع . يصور الشكل ٢٢ - ٥ هذا الموقف تخطيطيا حيث تمثل الخطوط التي بين الذرات الكترونا مشتركا . لاحظ أن كل ذرة جرمانيوم حولها ثمانية الكترونات وبذا تكتمل قشرتها الخارجية ، ومثل هذا الموقف موجود بالنسبة للسيليكون .



شكل ٢٢ - ٥

يسمح الترابط الاسهامي
لكل ذرة في الشبكة أن تملأ
قشرتها ولا يوجد الكترون
واحد حر كي يتحرك في
الشبكة

افترض الآن اننا أضفنا - عن عمد . كمية متناهية في الضآلة من ذرات الزرنيخ كشوائب للجرمانيوم الذى تصنع منه بللورة . وقد استخدم الزرنيخ لانه العنصر الذى يلى الجرمانيوم في الجدول الدورى وله نفس الحجم الذى لذرة الجرمانيوم وعلى هذا فذرات الزرنيخ الشائبة تتلائم جيدا في الشبكة البلورية وتحل محل ذرة الجرمانيوم كما يوضح الشكل ٢٢ - ٦



شكل ٢٢ - ٦

عندما تحمل ذرة الزرنيخ
خماسية التكافؤ محل ذرة
جرمانيوم في البلورة من
الجرمانيوم فإن الإلكترون
التكافؤ الخامس لن يكون
مطلوبا لتكملة الترابط
الاسهامي وهو لهذا حر
نسبيا في أن يتحرك داخل
البلورة

شكل ٢٢ - ٧

ترك ذرة الجاليوم الشائبة
ثلاثة التكافؤات في موقع
الترابط (a) داخل شبكة
الجرمانيوم كما في (b).
وموقع الفجوة يتحرك هنا
وهناك لأن الإلكترونات
تقوم بإزاحته. لقد تحرك في
(د) بحرية بعيدا عن ذرة
الجاليوم وأصبح تقريبا فجوة
حرة الحركة. لاحظ أن
ذرة الجاليوم الشائبة قد
أصبحت سالبة الشحنة بينما
تحمل الفجوة شحنة موجبة
معا.

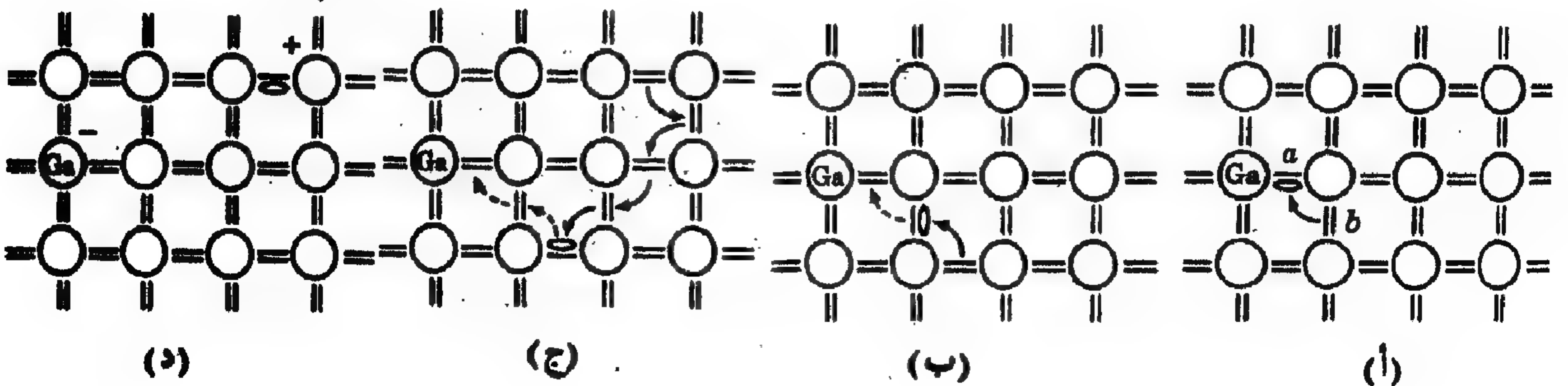
ولأن الزرنيخ خماسي التكافؤ وليس رباعيا ، لذا فله إلكترون فائض لا يجد مكانا في
الشبكة ولذا يكون ضعيف الارتباط بذرة الزرنيخ وسهل عليه الهرب ، فإذا ما صار
طليقا أمكنه أن ينتقل خلال البلورة بحرية تامة مثلما يفعل الإلكترون حر داخل معدن
وعلى هذا فالجرمانيوم الذي هو أصلا غير موصل (غير موصل لأن الإلكترونات مقيدة
باحكام داخل تركيب الشبكة قد اكتسب عدد قليل من الإلكترونات الطليقة)
واحدا من كل ذرة زرنيخ شائبة .

وتصير الآن البلورة المشوبة موصلا وحيث أن عدد الإلكترونات الطليقة ضئيل لذا
فهى موصل رديء أو شبه موصل .

وهذا النوع من الأنظمة يمكن الحصول عليه أيضا بإضافة قليل من الذرات
الشائبة خماسية التكافؤ الى السيليكون (أى الذرات تتوقع أن تكون الأفضل ؟)
ويحتوى هذا النوع من البلورات المشوبة مزيدا من الإلكترونات التى تعمل كناقلات
للشحنة فتحمل التيار خلال البلورة ويسمى هذا النوع من البلورات شبه موصل
سالب النوع ، وذلك لأن ناقلات الشحنة سالبة .

وهناك نوع آخر من أشباه الموصلات يصنع بإضافة ذرة ثلاثية التكافؤ مثل
الجاليوم الى الجرمانيوم. وفي هذه الحالة تفتقر الذرة الشائبة الى إلكترون واحد يلزم لكنى
تصبح الشبكة مكتملة . وهذا الثغرة الالكترونية التى يمثلها الشكل البيضاوى
في شكل ٢٢ - ٧ أ تسمى فجوة . ولكن الإلكترون الموجود عند b فى شكل
٢٢ - ٧ أ سيقوم الآن بالانزلاق بسهولة ليملأ هذه الفجوة مخلفا بهذا فجوة وراءه فى b
فينزلق اليها الإلكترون آخر وهكذا . أى أن الفجوة تصبح طليقة بعيدا عن ذرة
الشوائب الاصلية وتتجول داخل البلورة الى حد ما بحرية . وبعد فترة قصيرة
يكون الموقف كما هو موضح فى الشكل ٢٢ - ٧ ب ، ج ، د .

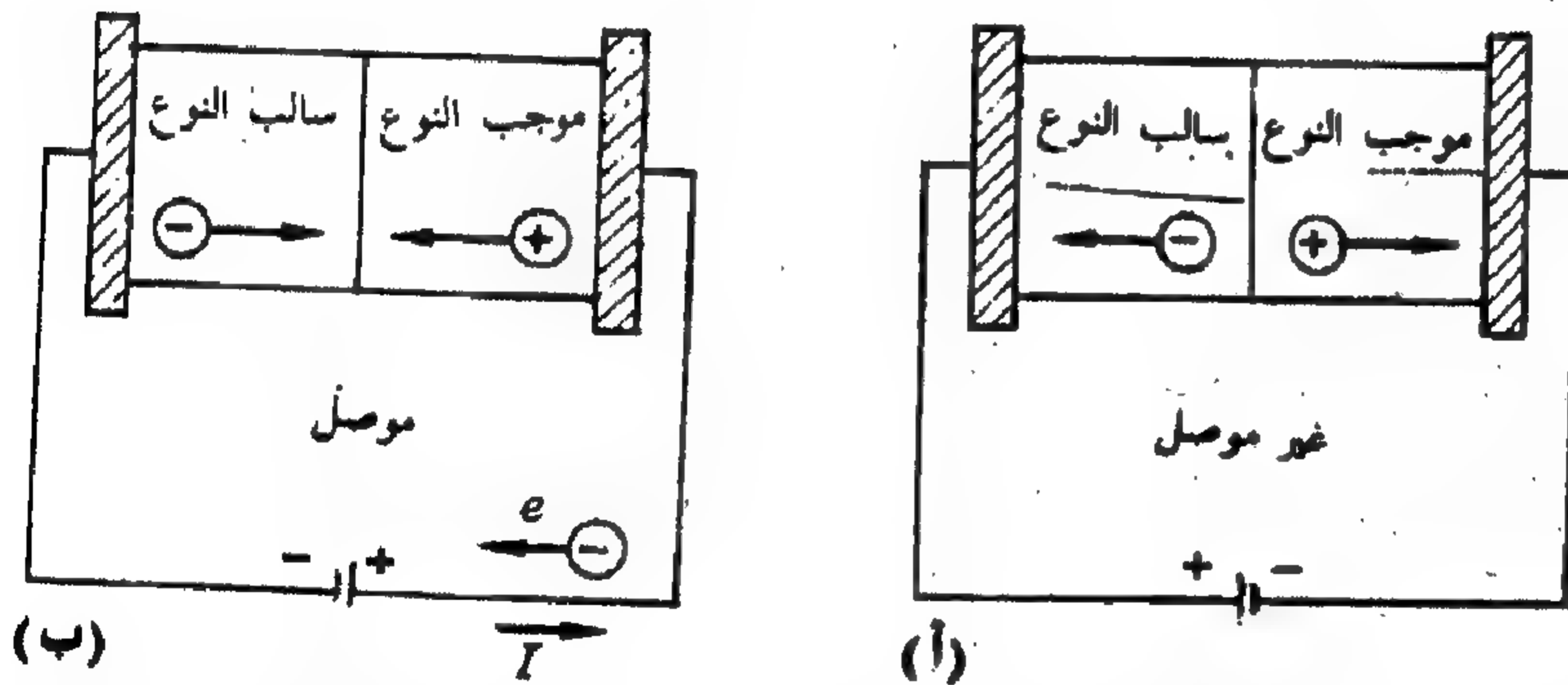
لاحظ ان المنطقة القريبة من الفجوة فى الشكل ٢٢ - ٧ د قد أصبح بها مزيد
من الشحنة الموجبة ولم تعد متعادلة (هى فى الواقع تشكو من نقص الإلكترون



واحد) من ناحية اخرى فان ذرة الجاليوم الشائبة قد أصبح لديها الآن أكثر مما ينبغي وبهذا لم تعد هي الأخرى متعادلة . على أن الالكترونات الزائدة قرب ذرة الجاليوم مرتبطت باحكام تام الى الشبيكة ولذا فهو غير حر في الحركة في الوقت الذى لازالت فيه الفجوة حرة في الحركة . وكلما تحركت الفجوة انتقلت معها الشحنة الموجبة الزائدة . ومن ثم فان الحركة الحرة - الى حد ما - للفجوة خلال البللورة تكافئ شحنة موجبة تتحرك بحرية خلال البللورة . يسمى هذا النوع من البللورات شبه الموصلة شبه موصل موجب النوع وذلك لان التيار تحمله فجوات موجبة الشحنة .

شبه موصل موجب النوع

لصنع مقوم من صمام ثنائى شبه موصل فاننا نجمع شبه موصل سالب النوع مع آخر موجب النوع كما فى الشكل ٢٢ - ٨ (أ) ، (ب) . (من الناحية العملية توضع قطع صغيرة جدا من بللورة شبه موصلة بين اقطاب معدنية . وتوضع المجموعة كلها داخل غلاف معزول مع اطراف تصل الى اللوحين المعدنيين . تكون كل قطعة من شبه الموصل متعادلة كهربيا فى الاصل بطبيعة الحال . علاوة على ذلك ، حيث أن الألواح المعدنية يمكنها استقبال أو اعطاء الكترونات عند الحاجة لذا فالفجوات والالكترونات الزائدة يمكنها الانتقال بحرية نسبيا خلال الوصلة مع المعدن وليس هذا سهلا عند وصلة شبه الموصل كما سنرى .



شكل ٢٢ - ٨
يقوم الصمام الثنائى بتوصيل
التيار فى (ب) ولكنه لا
يوصله حين يتعكس الجهد
كما فى (أ)

افترض ان جهدا طبق على الصمام الثنائى كما هو مبين فى الشكل ٢٢ - ٨. أ. ستتحرك الالكترونات والفجوات فى الاتجاهات المبينة . وبما أننا نحاول جاهدين أن نفصل الشحنات السالبة عن الموجبة فان هذا يتطلب قدرا كبيرا من الشغل . لن يمر تيار مطرد فى هذا الموقف لأنه يمكن نزع عدد قليل فقط من الالكترونات والفجوات من شبه الموصل ونتيجة لهذا لن يقوم الصمام الثنائى بتوصيل التيار فى الاتجاه الذى تفرضه البطارية فى الجزء (أ) . أما فى الجزء (ب) فان البطارية المعكوسة ستجمع الالكترونات والفجوات معا وبذا يقوم الصمام الثنائى بالتوصيل .

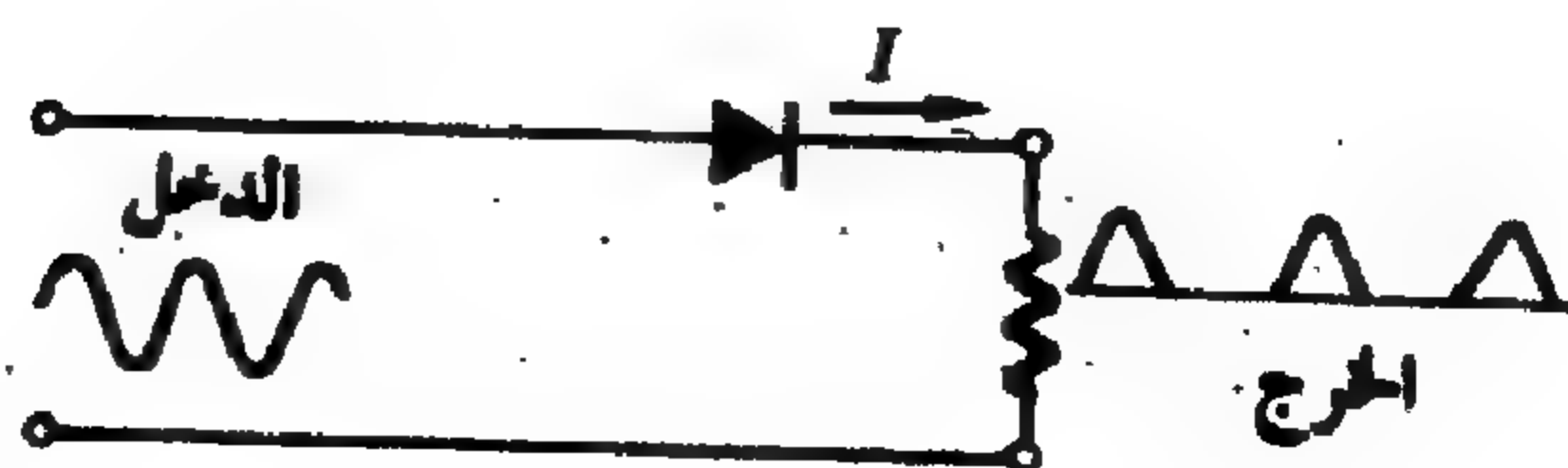
٢٢ - ٤ تطبيقات النيطات الالكترونية

سنقدم في هذا القسم قليلا من التطبيقات الهامة للصمامات وبعض النيطات الالكترونية البسيطة الاخرى وقد اصبحت تقنية الالكترنيات من التعقيد بحيث أن معظم من يستخدمون نيطات الكترونية لا يتوقع منهم أن يكونوا على دراية بالتركيب المفصل لها. وبدلا من هذا فاننا عادة ما نعتبر أن مجموعة الصمامات المفرغة ، الصمامات الثنائية ، الترانزستور ونيطات الحالة الصلبة الأخرى كوحدات مصممة لأغراض محددة . فعلى سبيل المثال يعتبر التركيب الداخلى لمضخم الكتروني معقدا بدرجة كبيرة ولكن المضخم كوحدة متكاملة يقوم ببساطة بتحويل دخل معين الى جهد خرج اكبر بكثير وإذا كان المضخم جيدا فان أمواج جهد الدخل والخرج تكون بنفس الشكل تماما . وكما نرى فان وظيفة ونتائج تشغيل وحدة المضخم يمكن فهمها بسهولة على الرغم من أن التركيب الداخلى معقد جدا .

لكي نكتسب خبرة في مجال استعمال النيطات الالكترونية كوحدات دوائر سنقوم بفحص قليل من تطبيقاتها وكما ستري لابد أن نعرف أثر النيطة على اشارة الدخل ولكن التشغيل الداخلى للنيطة لن يكون ذا أهمية رئيسية في المناقشة .

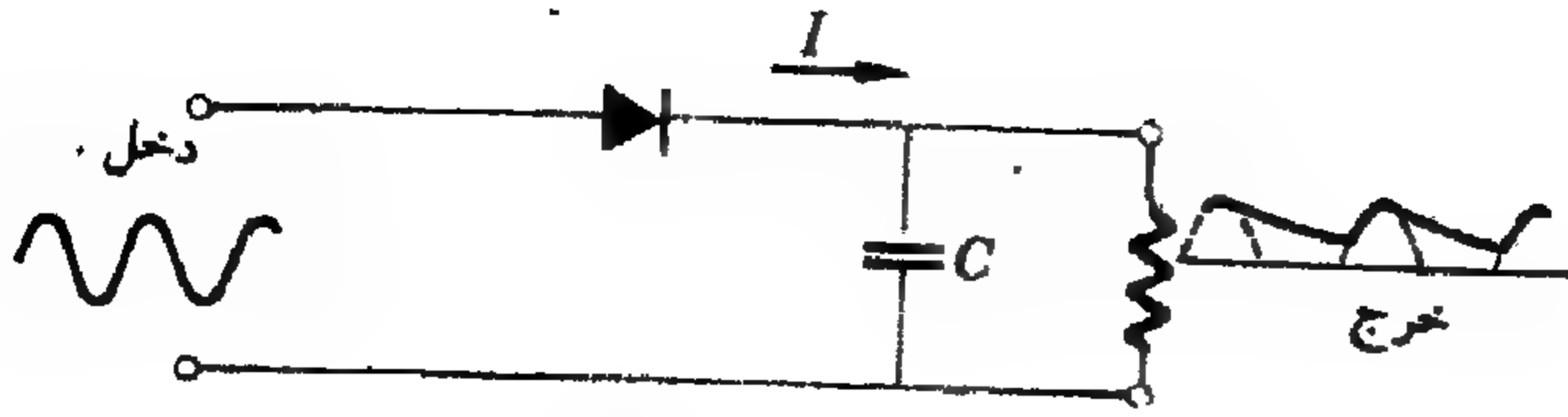
١ - مقوم نصف - موجى لقد رأينا فيما سبق كيف تعمل هذه النيطة وهى مبنية مرة ثانية فى الشكل ٢٢ - ٩ . رمز الصمام الثانى هو ∇ وهو يوصل فى اتجاه السهم .

٢ - مقوم نصف موجى ، مرشح . هناك مكثف C قد وضع عبر الخرج كما يوضح الشكل ٢٢ - ١٠ . لو أن تيارا يسحب من الخرج ، فإن المكثف سيصبح مشحونا تماما ويحفظ بجهد مستمر (dc) عند الخرج . يعمل الخرج من الناحية العملية - كمقاومة قيمتها R . فلو أن R كانت كبيرة بما يكفى فان الثابت الزمنى RC سيكون أكبر من فترة الذبذبة لموجة الجهد ، ثم يقوم المكثف بتصريف كمية ضئيلة خلال كل نبضة للجهد ويكون الخرج منتظما تقريبا (ويحدد مفهوم « الانتظام » بكمية « التموج » ، وهى النسبة بين تغيرات الجهد والقيمة العظمى للجهد خلال الدورة)



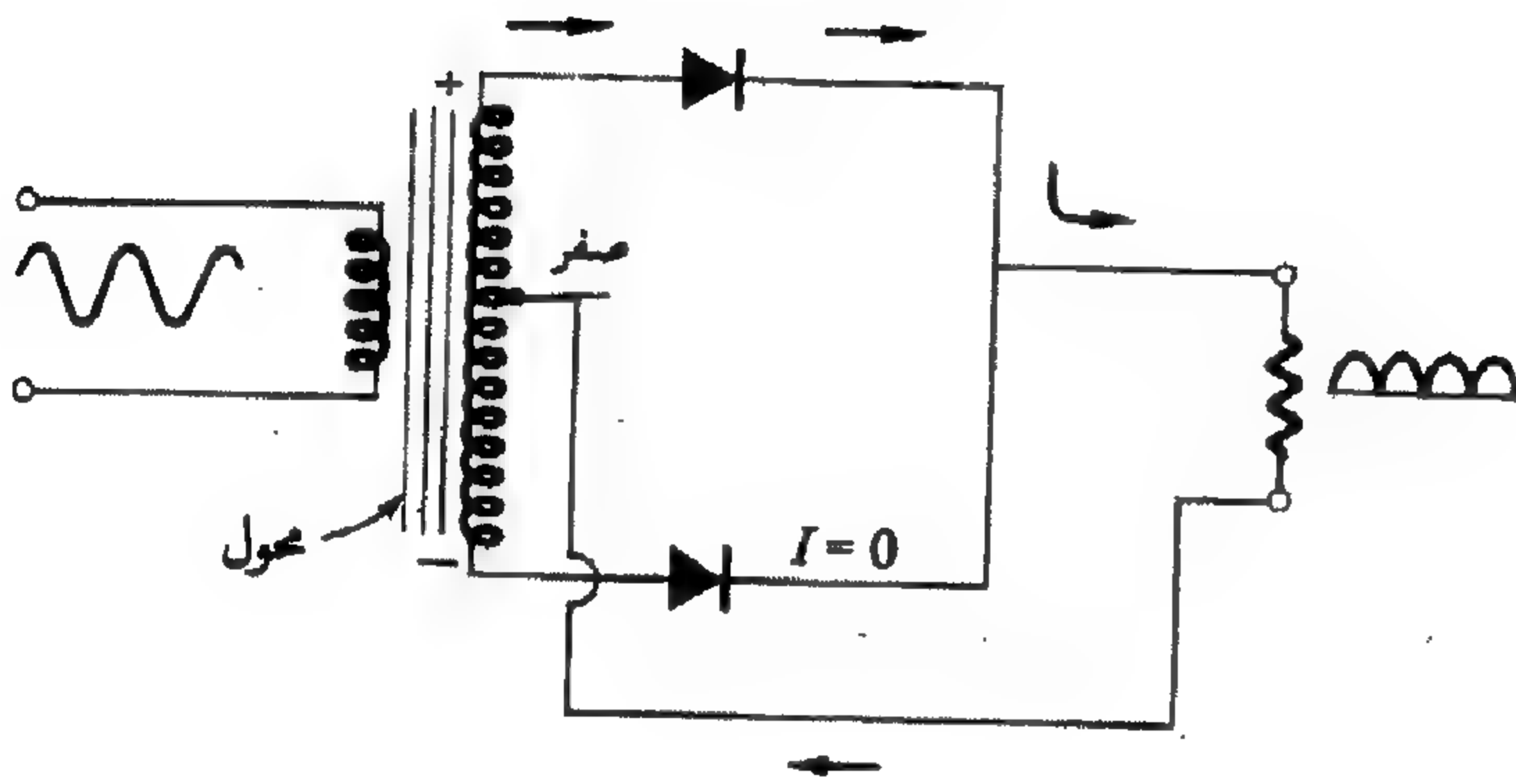
شكل ٢٢ - ٩
مقوم نصف موجى

شكل ٢٢ - ١٠
مقوم نصف - موجى مرشح



٣ - مقوم الموجة الكاملة

بالنسبة للموقف المبين في الشكل ٢٢ - ١١ يكون الطرف الأعلى للثانوى موجبا والأسفل سالبا وبعد نصف دورة تال ينعكس الجهد ولكن الصمام الثانى الاسفل سيقوم بتوصيل التيار نحو اليمين نتيجة لهذا يتوفر للمخرج تيار خلال نصفى الدورة .



شكل ٢٢ - ١١
مقوم الموجة الكاملة . يقوم
المحول ذو المحبس المركزى
بتوفير مصدرى جهد بينهما
تفاوت فى الطور مقدراه
نصف دورة

٤ - دائرة انبوبة أشعة - اكس

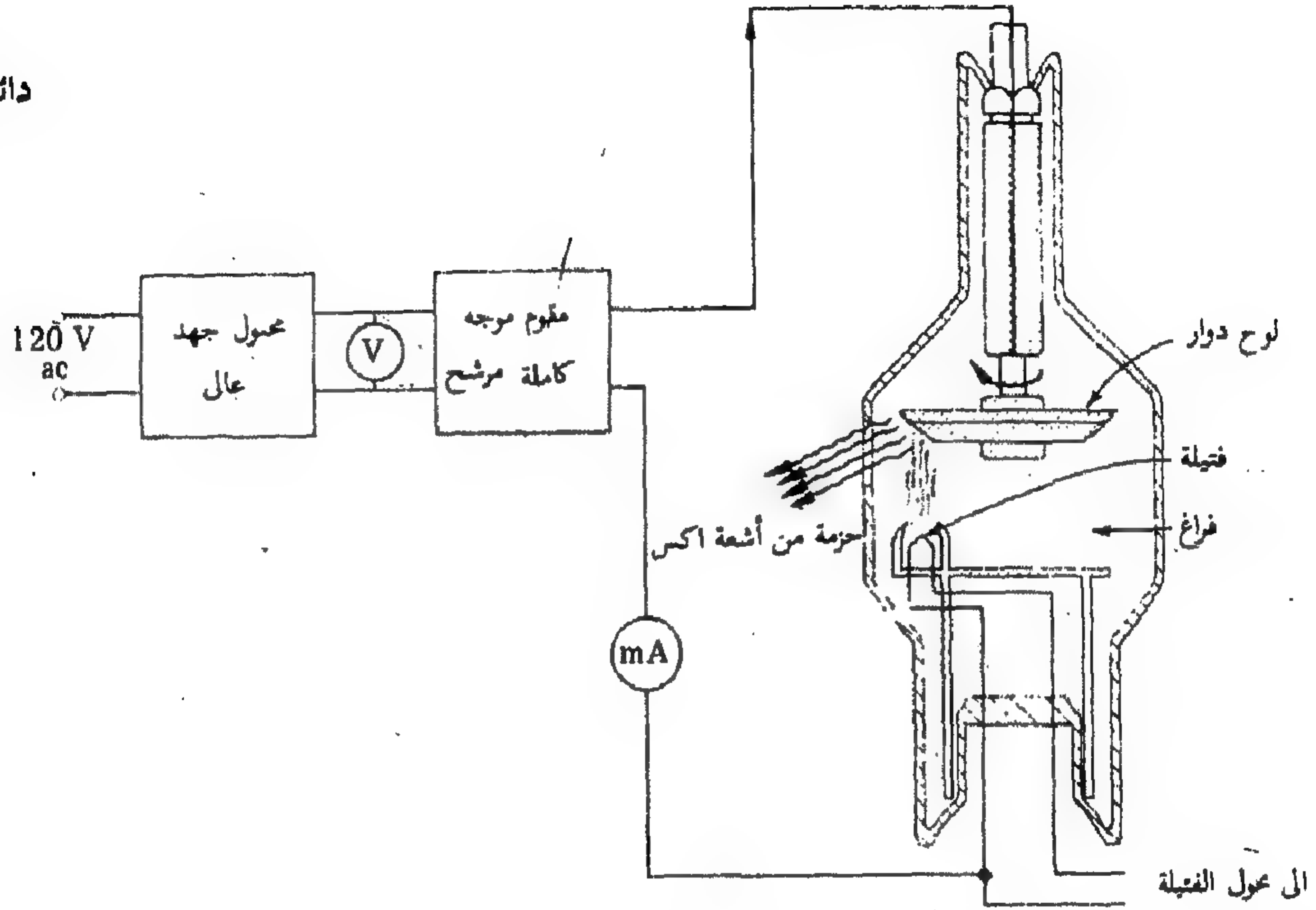
بالرجوع الى الشكل ٢٢ - ١٢ نجد أن الالكترونات تعجل داخل الانبوبة خلال فرق جهد عال بين الفتيلة واللوح ، ويتسبب اصطدام الالكترونات باللوح فى توليد أشعة اكس عن طريق عمليات سنناقشها فى الفصل السابع والعشرين . يقوم الشعاع الالكترونى بتسخين اللوح فى حالة الأنابيب ذات المخرج العالى ولتقليل هذا التأثير يدار اللوح بسرعة أمام الشعاع .

كما ترى يمكننا توصيل المعلومات الخاصة بدائرة الكترونية بدون عرض تفاصيل كل نبيطه . ونطلق على رسم كالأدى فى الجزء الايسر من شكل ٢٢ - ١٢ رسم تخطيطى للمراحل ، ودائما ما يبين سلك واحد فقط من الاثنين فى مثل هذه الرسومات أما السلك الاخر فيؤخذ على انه متصل بالأرض ويلغى من الرسم . لنترك الآن مناقشة النبيطات الالكترونية ونتحول الى موضوع الامواج الكهرومغناطيسية .

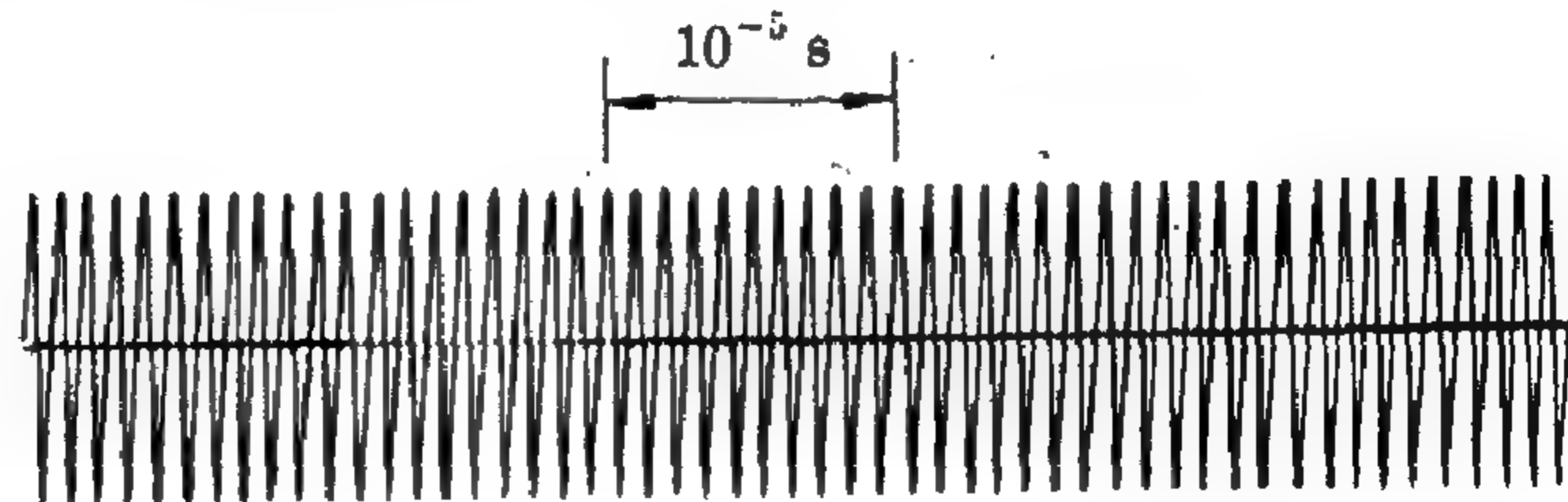
٢٢ - ٥ توليد أمواج اللاسلكي

قبل أن نبدأ دراستنا حول الطريقة التي تنقل بها الاشارات الكهربائية والمغناطيسية خلال الفضاء ، لنناقش قليلا من السمات الفرعية للأمواج اللاسلكية . وعلى الرغم من أن هذه الافكار المبدئية ستعدل وتطور في أقسام تالية إلا أنها ستتمكننا من إستيعاب المبادئ الأيسر في هذا الموضوع .

شكل ٢٢ - ١٢
دائرة انبوبة اشعة اكس



يُخصص لكل محطة اذاعة تردد لا سلكي معين تعمل عنده وتقع الترددات فيما بين ما يقرب من 500,000 الى 1,700,000 cps لمحطات الاذاعة التجارية العادية سنعتبر الآن محطة حصص لها تردد يبلغ 1,000,000cps وذلك لاغراض المناقشة المبدئية للموضوع . سيكون هذا التردد مبينا على معظم مؤشرات أجهزة الراديو بالرقم 1000 kc/s -تستخدم المحطة المخصص لها هذا التردد جهدا مترددا مقداره 1×10^6 cps وبوضح الشكل ٢٢ - ١٣ ربما بياننا للعلاقة بين هذا الجهد مع الزمن . يطبق هذا الجهد على الملف الابتدائي للمحول كما هو مبين بالشكل ٢٢ - ١٤ والجهد الناشئ بالحث في الملف الثانوي للمحول يستخدم لوضع شحنات على هوائي الارسل لمحطة الاذاعة .



شكل ٢٢ - ١٣
يكون الجهد المتردد المستخدم لتشغيل جهاز الارسل الذي يناقش في هذا القسم جييا
ذا تردد يبلغ 10^6 cps

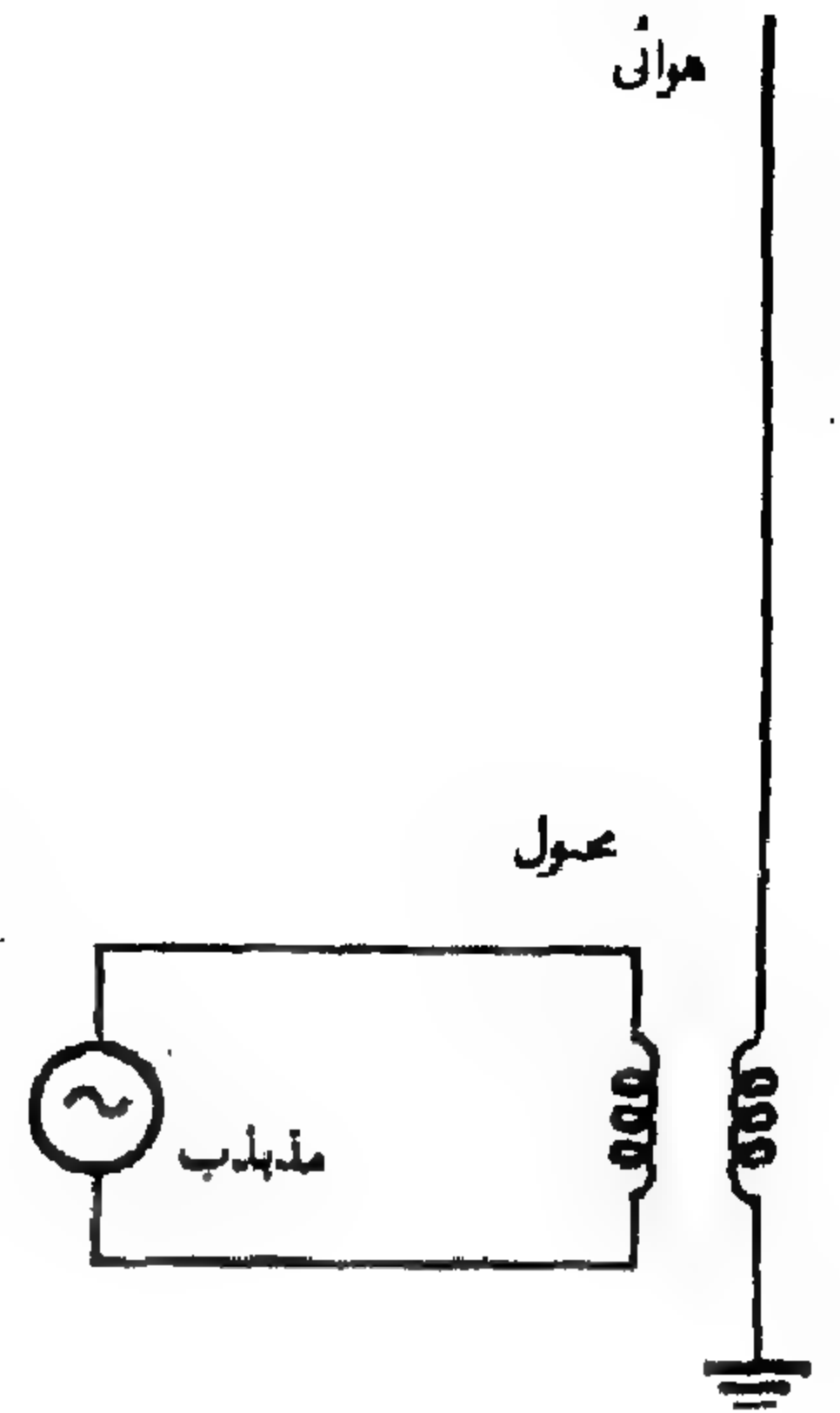
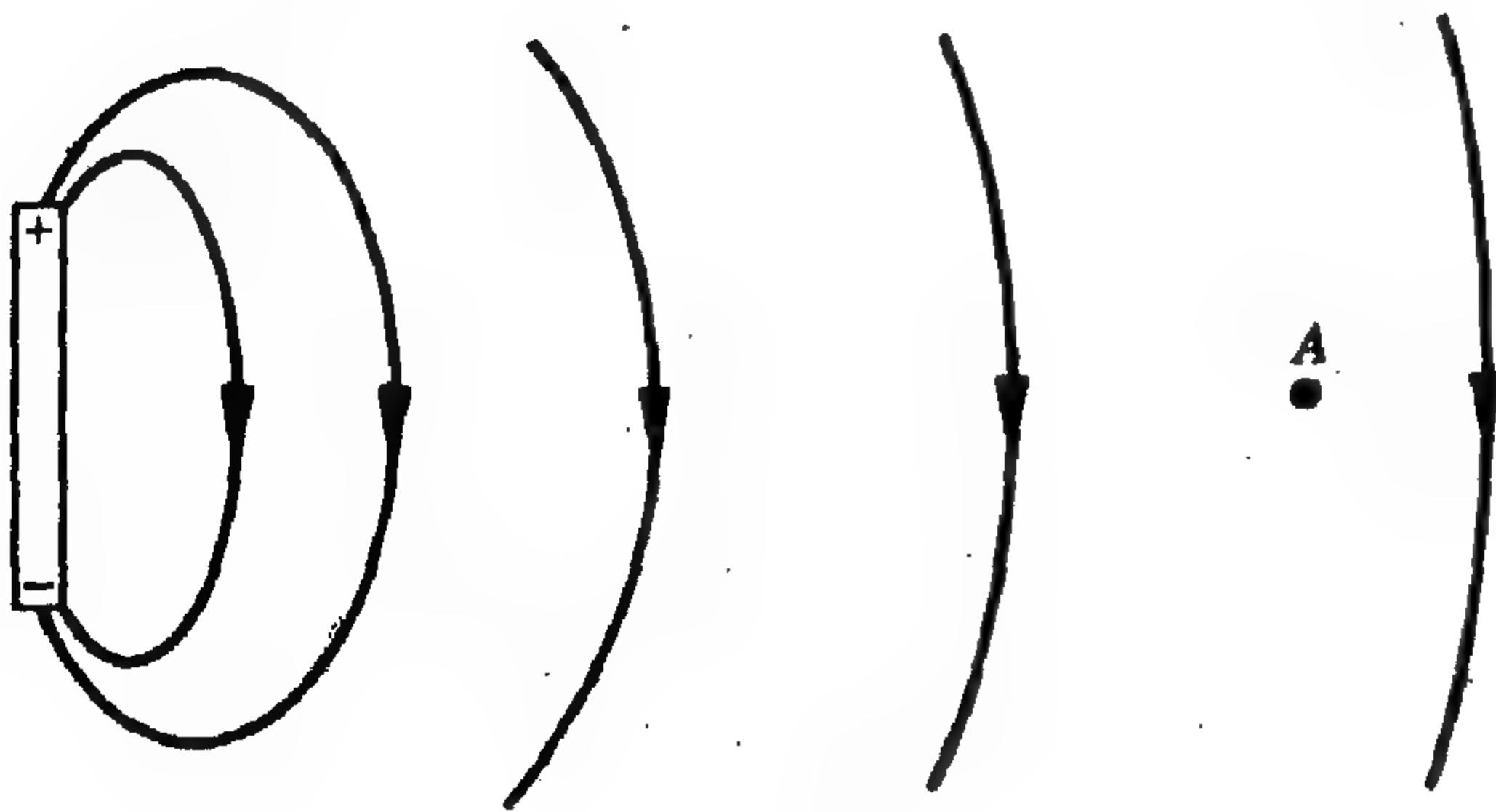
يمكن اعتبار الهوائى كقطعة طويلة من السلك كما فى الشكل ٢٢ - ١٤ ، وفى حالة محطتنا هذه يشحن الطرف العلوى للهوائى بشحنة موجبة بالنسبة للطرف السفلى 1×10^6 مرة كل ثانية ، وحيث ان جهد الشحن يتردد ، فان الشحنة التى على الهوائى مستعكس بشكل دائم .

لنعتبر الآن ما يحدث فى اللحظة التى يكون فيها الهوائى موجب الشحنة عند طرفه الأعلى وسالبا عند الأسفل كما هو مصور فى الشكل ٢٢ - ١٥ ، حيث يظهر المجال الكهربائى حول السلك الى حد ما كما هو مبين .

ولكن ، بعد لحظة تالية ينعكس اتجاه المجال لأن شحنة الهوائى ستكون منعكسة بالنسبة للمبينة بالشكل . وبعد لحظة أخرى يعود الهوائى فيشحن بالطريقة المبينة بالشكل ويعود المجال أيضا كما كان . وفى الحقيقة يكون عدد المرات التى ينعكس فيها المجال فى الثانية الواحدة مساويا لضعف تردد الموجة الحاملة لمحطتنا ، 1×10^6

مما سبق يظهر أن مشاهدا على بعد عدة أميال من الهوائى عند النقطة A فى الشكل ٢٢ - ١٥ مثلا ، سيلاحظ أن هناك مجال كهربائى قائم عند تلك البقعة . ينتج هذا المجال من الشحنات المستقرة على الهوائى . سيكون المجال ضعيفا جدا طبعا ولكنه سيكون متذبذبا كدالة فى الزمن ، اما تردده فسيكون هو نفس تردد محطة الاذاعة .

لنر الآن كيف يتشكل المجال الكهربائى فى الحيز القريب من الهوائى . يوضح الشكل ٢٢ - ١٦ صورة المجال الكهربائى وهو يتطور مبتعدا عن الهوائى ، فالجزء (أ) يوضح الموقف عند بداية شحن الهوائى . بمرور الوقت تتضاءل الشحنة (الجزء ب) ، فتصبح صفرا (الجزء جـ) ثم تصبح سالبة تماما (الجزء د) وفى النهاية ، فى (الجزء هـ) ، يتضح الموقف بعد مرور دورتين عقب الجزء (جـ)



شكل ٢٢ - ١٤

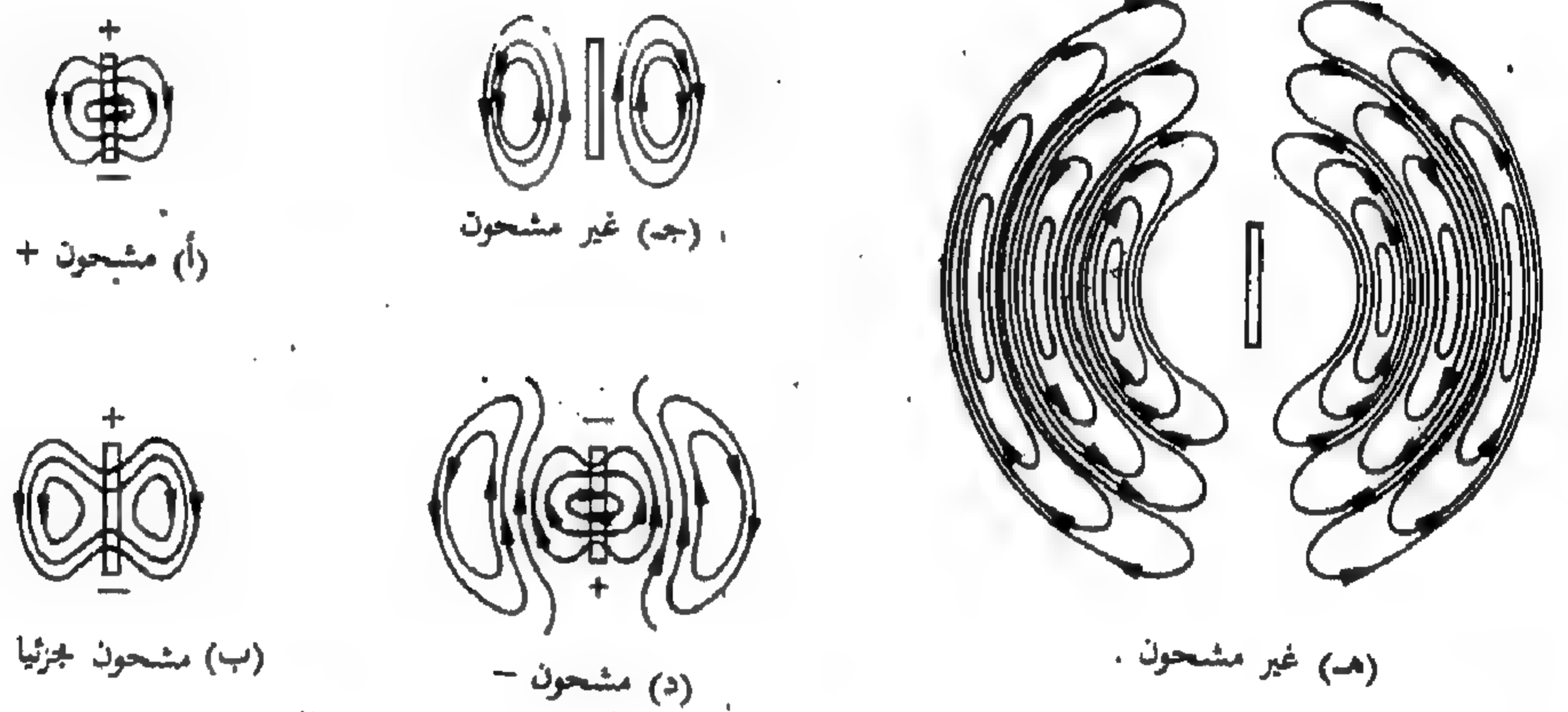
يستخدم مصدر جهد متردد
عالى التردد لشحن قمة الهوائى
بشحنة موجبة وسالبة
بالتناوب

شكل ٢٢ - ١٥

حين تتذبذب شحنة الهوائى
جئة وذهابا ، يتغير المجال
الكهربائى عند A بحيث يتجه
الى أعلى وإلى أسفل بالتناوب

افترض أن هوائى الشكل ٢٢ - ١٦ يرسل المجال الكهربائى الى سطح الكرة الأرضية بين الشكل ٢٢ - ١٧ أ الجانب الأيمن من الشكل ٢٢ - ١٦ د . لو كان سطح الأرض ممتدا فى اتجاه محور x ، فإن المجال الكهربائى على طول سطح الأرض سيكون كما فى الجزء (ب) و (جـ) من الشكل لاحظ أنه عند النقطتين A ، C يتجه المجال الكهربائى الى أسفل بينما يتجه عند B الى أعلى ولكن المجال الكهربائى الذى يولده الهوائى ينتقل عبر الأرض بسرعة معينة مقدارها v ونتيجة لهذا يتعرض انسان يقف عند النقطة A لمجال كهربائى يتذبذب ويتحرك موجة المجال الكهربائى الموضح فى الأجزاء (أ) و (ب) و (جـ) نحو اليمين وعندما تمر قمة بالنقطة A يكون المجال متجها لأعلى أما حين يمر بالنقطة A بطن فإن المجال يتجه لأسفل .

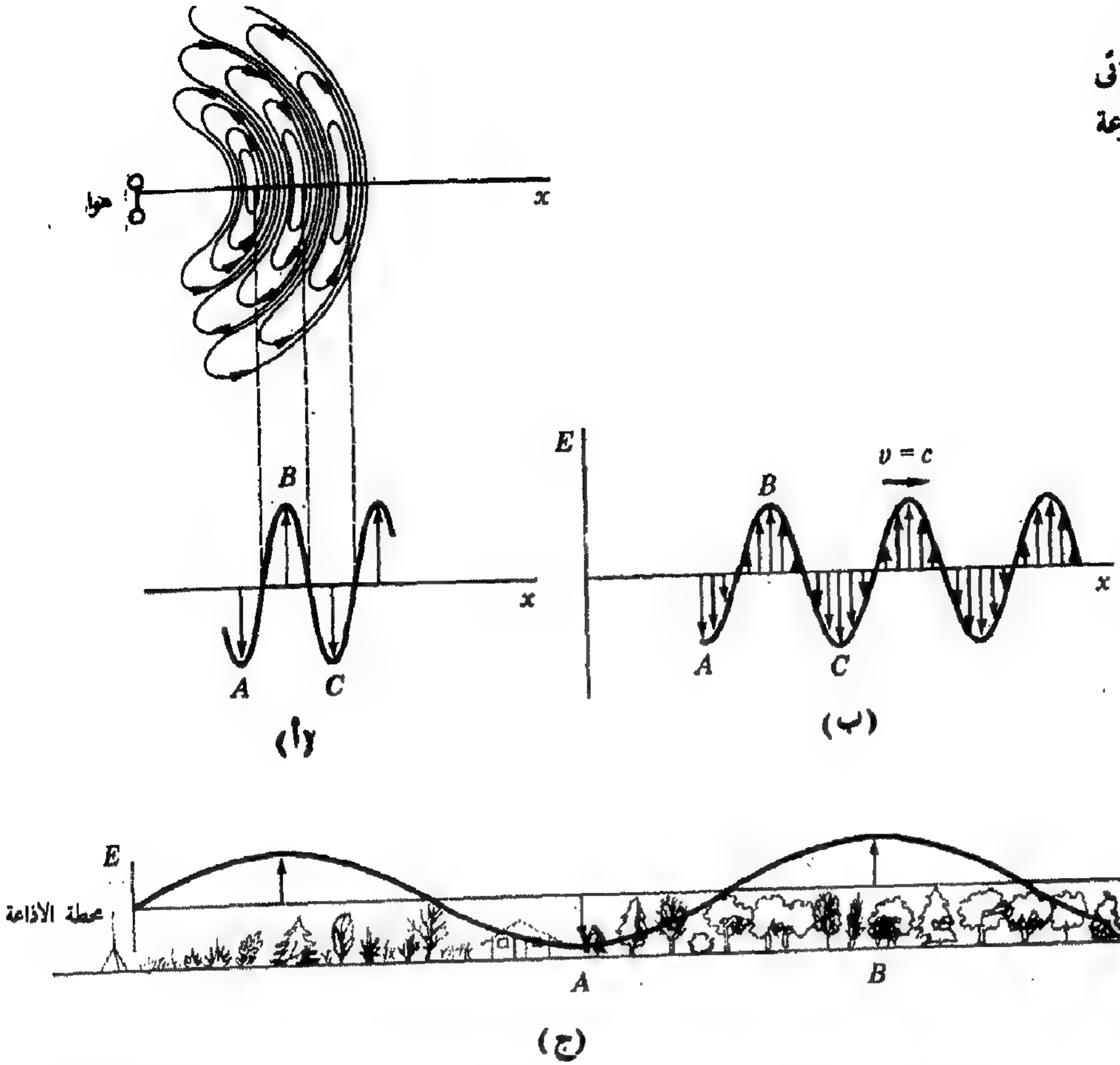
شكل ٢٢ - ١٦
تتحرك المجالات الكهربائية
الموضحة مبتعدة عن الهوائى
وحين تمر بنقطة بعيدة فإن
المجال عند تلك النقطة
يعكس اتجاهه بتردد هو نفسه
تردد محطة الإرسال



من هنا نرى أن كل نقطة على سطح الأرض ستتعرض لمجال كهربائى متذبذب بتردد يتساوى مع تردد المصدر وهو الشحنة المتذبذبة على هوائى محطة الاذاعة . تخضع موجة المجال الكهربائى التى يبعث بها المصدر لنفس العلاقة التى أوجدناها للأمواج الأخرى كلها ، فيرتبط الطول الموجى λ والتردد f والسرعة v بالعلاقة $\lambda = v/f$. يبلغ تردد الموجة التى ترسلها محطة الاذاعة 10^6 Hz ، فإذا علمت السرعة v التى تتحرك بها موجة المجال الكهربائى لأمكن تعيين الطول الموجى لها . وقبل أن نناقش سرعة هذه الموجات سنتوقف لحظة عند مظهر آخر للإشارة المرسله من الهوائى .

هناك موجة مجال مغناطيسى يرسلها الهوائى بالإضافة الى موجة المجال الكهربائى ، وهذه الموجة تنتج من الحقيقة القائلة بأن تغير الشحنات على الهوائى يجعل تيارا يمر فى سلك الهوائى ، وقد رأينا سابقا أن هذا التيار يسبب مجالا مغناطيسيا يحيط

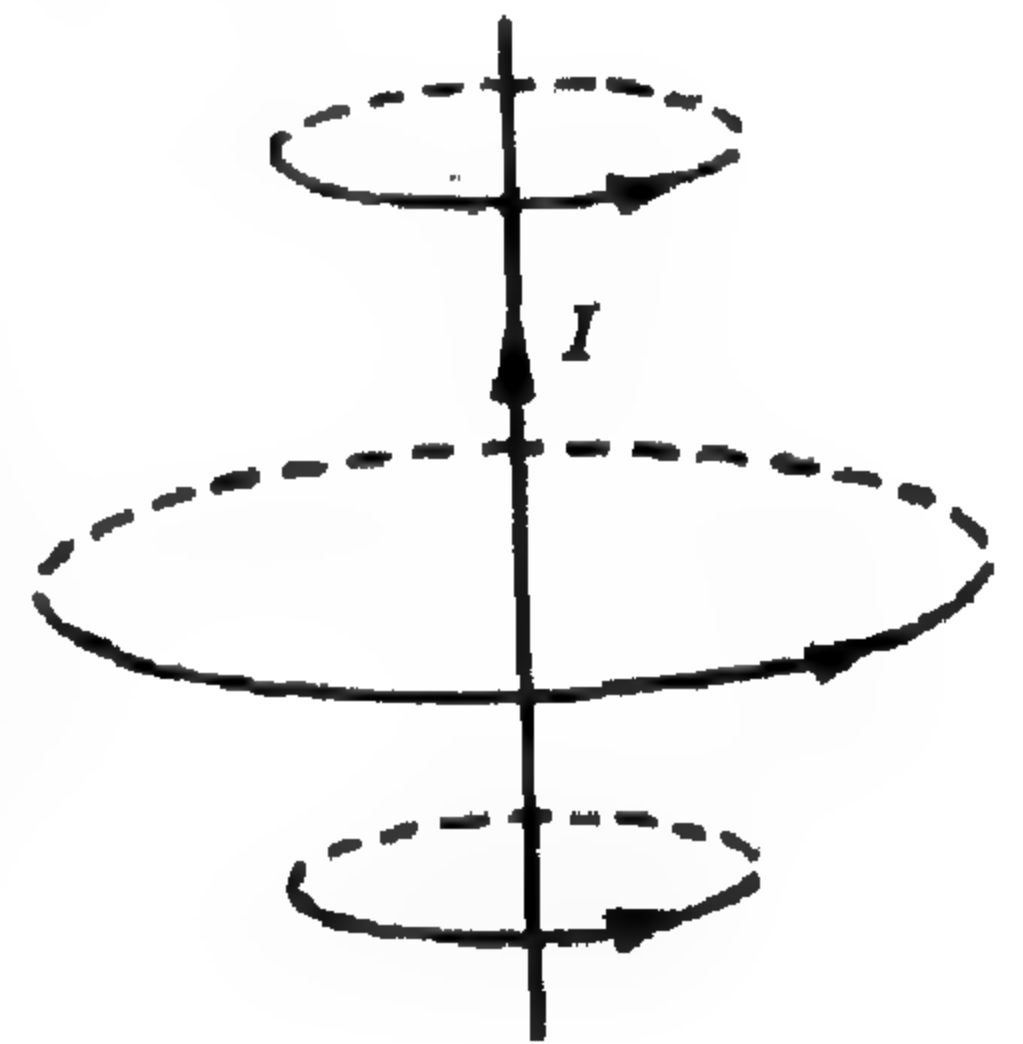
شكل ٢٢ - ١٧
تنتقل موجة المجال الكهربائي
مبتعدة عن الهوائي بسرعة
 $v = c$



بالهوائي كما في الشكل ٢٢ - ١٨ . لاحظ أن المجال المغناطيسي يتخذ اتجاهها متعامدا مع المجال الكهربائي . كما أنه يتذبذب في الاتجاه بنفس تردد محطة الاذاعة . لذا نرى أن مشاهدا يبعد عدة أميال عن الهوائي سيتعرض ليس فقط لمجال كهربائي متذبذب ولكن أيضا لمجال مغناطيسي متعامد مع المجال الكهربائي ويتذبذب معه . وهذا المجال الكهربائي والمغناطيسي الموحد هو ما نسميه موجة اللاسلكي الكهرمغناطيسية ك م للمحطة .

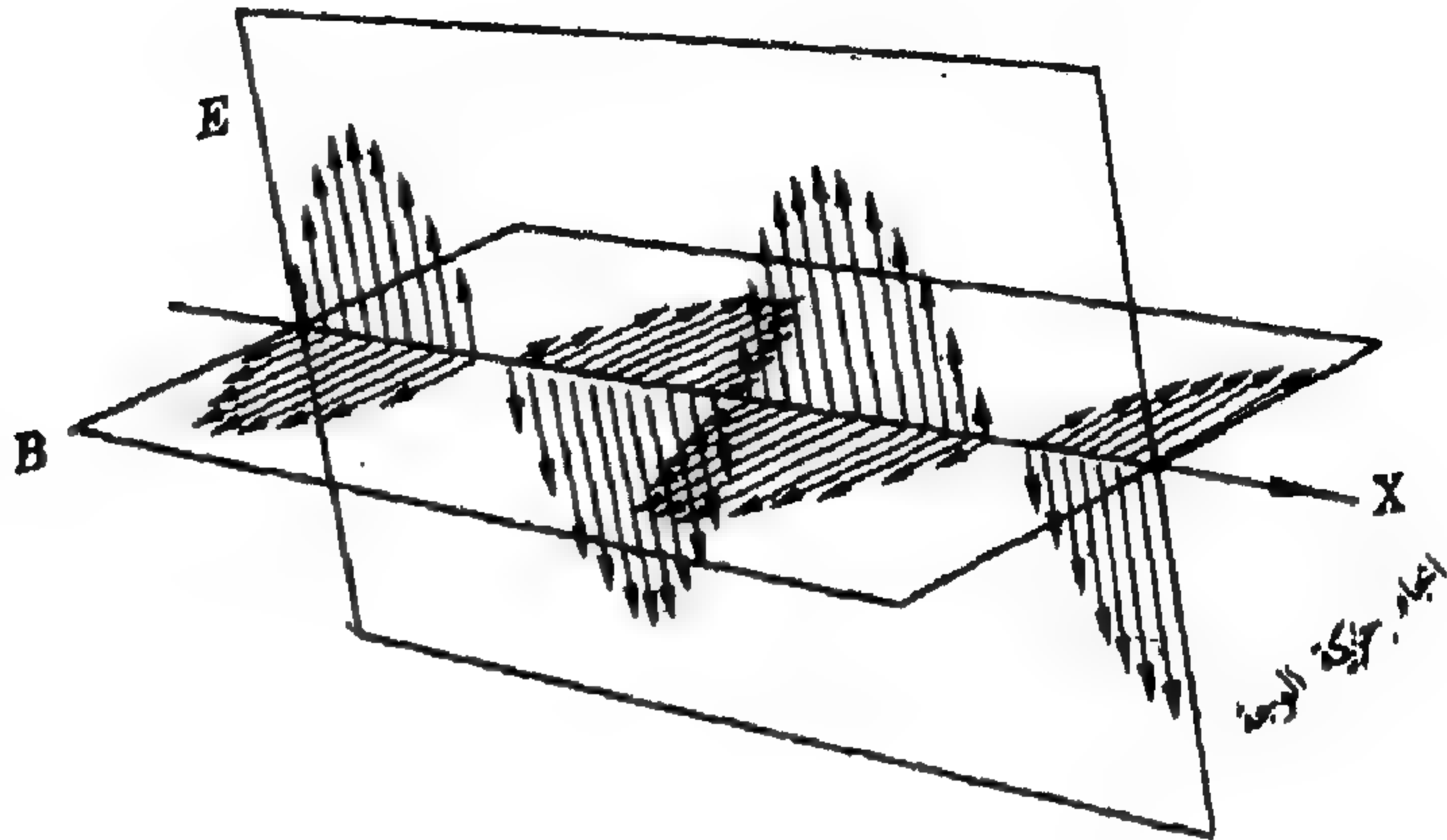
يمثل الشكل ٢٢ - ١٩ موجة (ك م) الموحدة هذه ، لاحظ أن المجال الكهربائي E متعامد مع المجال المغناطيسي B وكلتا الموجتان متطاورتان (والنقطة الأخيرة ليست واضحة ولكنها نتاج حسابات مفصلة) .

وقد أمكن التنبؤ بوجود أمواج (ك م) اللاسلكية من حسابات نظرية وذلك قبل ظهور أول جهاز للراديو بسنوات عديدة . وقد كان هذا التنبؤ على يد فيزيائي لامع هو جيمس كلارك ماكسويل في ١٨٦٥ ، فقد أمكنه أن يصيغ رياضيا القوانين التي



شكل ٢٢ - ١٨
يحيط مجال مغناطيسي بالهوائي

اكتشفها فاراداي والعلماء الآخرون في مجال الكهربية . ويبلغ عدد معادلاته الشهيرة معادلات ماكسويل ، أربعة معادلات ، وباستخدامها أوضح ماكسويل أن أمواج اللاسلكي يجب أن توجد . وقد وجد نظرياً أن سرعة هذه الأمواج في الفراغ يجب أن تكون $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ (سنأخذ هذه السرعة على أنها $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ وذلك للأغراض العملية وسنمثلها بالحرف c .



شكل ٢٢ - ١٩
يرسل الهوائي المتذبذب موجة
مجال مغناطيسي عمودية على
موجة المجال الكهربائي وترى
لقطة هذه الموجة
الكهرومغناطيسية (ك م) على
طول خط متعامد مع مركز
الهوائي .

وقد أدهشت هذه السرعة لأمواج اللاسلكي والتي تنبأ بها ماكسويل معاصرة (تذكر أنه في ذلك الوقت لم تكن مولدات أمواج اللاسلكي قد اخترعت بعد) . وقد كانت السرعة التي أوجدها مساوية تماماً للسرعة المقاسة للضوء وقد استنتج ماكسويل من هذه النتيجة أن أمواج الضوء هي صورة من أمواج (ك م) .

وقبل أن يغادر هذا القسم نود أن نشير الى حقيقة اعتبرت ضمناً : تنتقل أمواج (ك.م) في الفراغ ولا يلزم وجود أية مادة لانتشارها . وعلى عكس أنواع أخرى من الموجات التي درسناها فان هذه الامواج عبارة عن اهتزاز مجال وليس اهتزاز جسم مادي .

مثال توضيحي ٢٢ - ١ : تعتبر أقدم محطة اذاعة في الولايات المتحدة هي محطة KDKA في مدينة بيتسبرج التي بدأت عملها عام ١٩٢٠ وهي تعمل عند تردد يبلغ $1.02 \times 10^6 \text{ Hz}$ ما هو الطول الموجي لموجات (ك م) الخاصة بها ؟

طريقة الحل : نعرف أنه لجميع الأمواج تنطبق العلاقة $\lambda = v/f$ وفي هذه الحالة $v = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ، $f = 1.02 \times 10^6 \text{ Hz}$ بالتعويض نجد أن $\lambda = 294 \text{ m}$

٢٢ - ٦ طيف الأمواج الكهرمغناطيسية

تنتقل موجات (ك م) في الفراغ بسرعة قدرها $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ كما رأينا في القسم السابق . ولموجات اللاسلكى العادية أطوال موجية تصل الى عدة مئات من الامتار في الطول . وقد استنتج ماكسويل أن أمواج الضوء هي أيضا أمواج (ك م) .

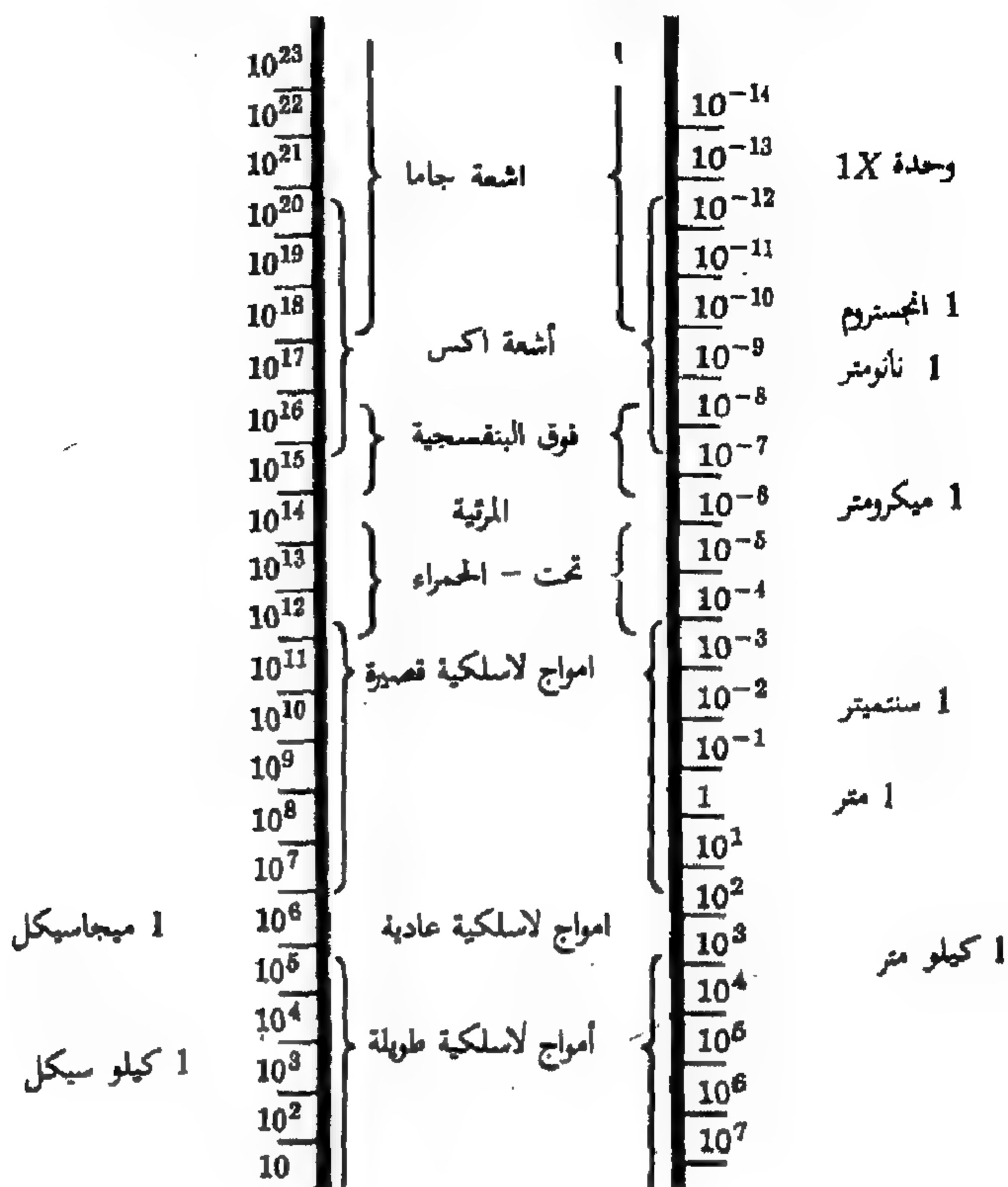
وقد أبدت الابحاث المتتالية استدلال ماكسويل على أن أمواج الضوء ليست الا امواج (ك م) . على أن الأطوال الموجية للضوء - كما سنرى في فصول قادمة - صغيرة الى حد بعيد . اذ تقع الأطوال الموجية لأمواج الضوء بالقرب من 0.0000005 m أو $5 \times 10^{-7} \text{ m}$ ويعتمد الطول الموجي المحدد للضوء على لونه ، فالضوء الاحمر له طول موجي قرب $6.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ بينما للضوء الازرق قرب $4.3 \times 10^{-7} \text{ m}$

وأى شخص يلاحظ هذا الفرق الكبير بين الأطوال الموجية لموجات اللاسلكى والضوء وكلاهما كهرمغناطيسى ، قد يتساءل اذا كان ثمة صور موجية أخرى فيما بين هذين النوعين . والحقيقة ان هناك أمواج أخرى . فنحن نستطيع مثلا انتاج أمواج لاسلكى ذات طول موجي أقصر بكثير من 100 m وذلك باستخدام مذبذبات عالية التردد جدا جدا ، ومن هذا النوع لدينا أمواج الرادار (الأمواج الدقيقة) ويمكن جعل أطوالها تصل الى 0.01 m . كما أننا نعلم أن الاشعاع الحرارى يتكون من أمواج (ك م) تقع أطوالها الموجية في الوسط بين أمواج الرادار وأمواج الضوء . وفي الحقيقة ليست الأمواج الحرارية ذات الطول الموجي القصير سوى ضوء تحت الاحمر كما قد يعلم معظم القراء .

يوضح الشكل ٢٢ - ٢٠ الامتداد الضخم للأطوال الموجية . للأمواج (ك م) التى تمتد من موجات اللاسلكى حتى أمواج الضوء ولا تتوقف الاشعاعات الكهرمغناطيسية عند الضوء الازرق اذ أن هناك أمواج كهرمغناطيسية أقصر من ذلك . وكلنا على الملم بالأمواج الأقصر التالية وهى الاشعاع فوق البنفسجى ، اما أشعة اكس فهى لازالت أقصر أيضا من ذلك . هناك نوع آخر من الاشعاع الصادر من المواد المشعة ونعنى به أشعة جاما وهى بالضرورة مثل اكس الا أن طولها الموجي أقصر .

يتضح اذن أن الأمواج (ك م) تتباين بشدة اعتمادا على أطولها الموجية ، وسنكرس الفصول القليلة القادمة من هذا الكتاب لدراسة مدى الأطوال الموجية القصيرة وهو الضوء العادى . وسندرس أنواعا أخرى من الاشعاع في الطيف (ك م) في فصول تالية .

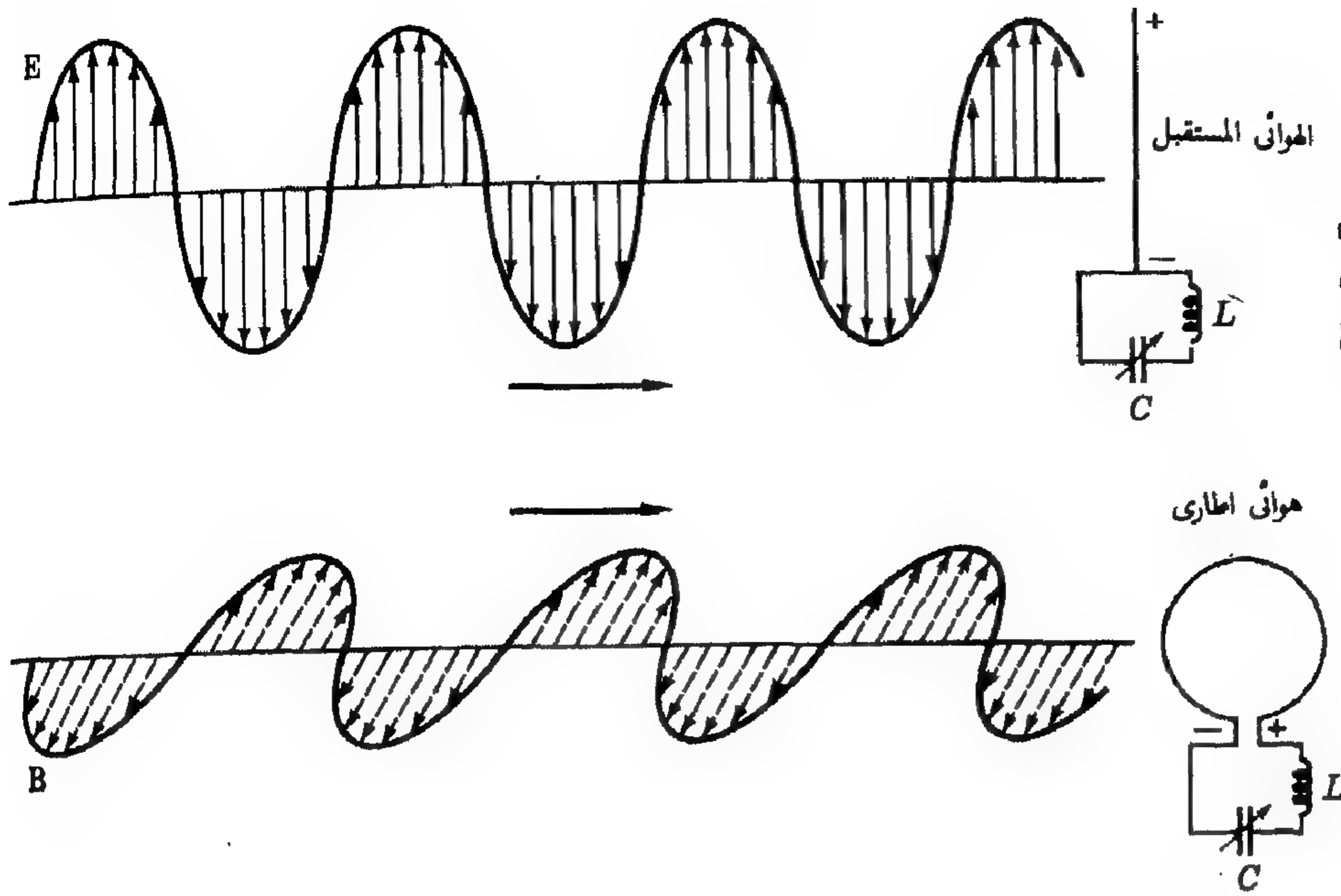
شكل ٢٢ - ٢٠
الطيف الكهرمغناطيسى



٢٢ - ٧ استقبال الأمواج اللاسلكية

يقوم جهاز ارسال اللاسلكى بتغطية المنطقة المحيطة به بمجال كهربائى يهتز بتردد محدد كما (رأينا). فاذا امسكنا بقطعة من السلك المستقيم فى هذا المجال، فان الالكترونات فى ذلك السلك ستتحرك تحت تأثير المجال الكهربائى المتذبذب. ومن الطبيعى أن المجال الكهربائى سيكون ضعيفا جدا عند مسافة تبعد أميالا كثيرة عن المرسل. ولكن اذا استعمل نظام كشف حساس لامتكنه قياس حركة الشحنات فى السلك نتيجة لوجود المجال ويعتبر جهاز الراديو نبيلة بنيت لهذا الغرض.

افترض أن المجال الكهربائى يتذبذب رأسيا كما هو مبين فى الجزء الأعلى من شكل ٢٢ - ٢١. سيقوم المجال بفصل الشحنات فى الهواءى الرأسى للراديو، فعندما يتجه المجال الى أعلى، مثلا فان قمة الهواءى ستكون موجبة الشحنة بينما طرفها الأسفل سالب الشحنة. ويسبب هذا، بالطبع، شحنة على المكثف C. على أن هذه الشحنة سرعان ما تفيض من المكثف خارجة لأنه بعد نصف دورة سيكون اتجاه المجال الى أسفل وعلى الشحنة الموجودة على الهواءى والمكثف أن تنعكس. وبعد نصف



شكل ٢٢ - ٢١
يعمل هوائي الراديو مثل
مصدر للجهد وذلك لان
موجة اللاسلكى المارة بجواره
تستحث فيه فرقاً للجهد

دورة آخر يقوم الهوائي بشحن المكثف كما كان في الأصل . من هذا نرى أن الهوائي
يستمد الطاقة من موجة اللاسلكى ثم يقوم باعطائها للمكثف .

ولو أن قيمة المكثف ضبطت بحيث كان التردد الطبيعى لدائرة LC هو
نفسه تردد محطة الاذاعة ، فان الدائرة سوف ترن تحت التأثير الحافز
للهوائي ، ونتيجة لهذا تتم في دائرة LC استجابة ضخمة لتأثير أمواج
اللاسلكى التى تناغمت الدائرة معها . وبهذا يصبح من الممكن موافقة
جهاز الراديو ليستقبل محطة بعينها . ستقوم الدائرة الرنانة ، اذن ، باظهار جهد
متذبذب عبر C يكون متناسبا تقريبا مع جهد الخرج لمحطة الاذاعة ، وهو يتكون من
موجة حاملة مضمنة بأثر النظام الميكروفونى للمحطة . ولكن الجهد عبر C سيكون
صغيرا الى حد بعيد الا بالنسبة للمحطات القريبة ولهذا السبب تقوم معظم اجهزة
الراديو بتضخيم هذا الجهد عن طريق دوائر الكترونية معقدة .

طريقة انتقاء التردد

لا تستعمل معظم أجهزة الراديو التى تحمل المجال الكهربائى المهتز.
وتستقبل بدلا منه الاشارة المرسله بجزء المجال المغناطيسى المهتز من موجة
(ك م) ، فكما يوضح الجزء الاسفل من شكل ٢٢ - ٢١ يستخدم هوائي
اطارى لكشف الجزء المغناطيسى من الموجة . فعند مرور الموجة خلال الهوائي ،
يقوم تدفقها المتغير بحث ق.د.ك فى الاطار-وتستخدم ق.د.ك هذه لحفز الدائرة الرنانة

مثلاً حدث في الحالة السابقة . يتكون الهوائى الاطارى عادة من ملف حول قضيب مصنوع من مادة ذات مغناطيسية حديدية ، الحديد . ولو أنك نظرت داخل جهاز صغير للراديو لرأيت هذا القضيب بسهولة .

ويظهر الهوائى الاطارى دائماً خواص اتجاهية . فلو أن الراديو كان متجهاً بحيث كان الهوائى بالنسبة للمجال كما هو مبين في شكل ٢٢ - ٢١ فإن الاستقبال يكون أحسن ما يمكن لماذا ؟ ولكن لو أن الهوائى أدير ٩٠° فإن الاستقبال يكون عند أدنى حد له . ويمكن استخدام هذه الخاصية للهوائى في تحديد موقع مصدر الامواج (ك.م) كيف ؟

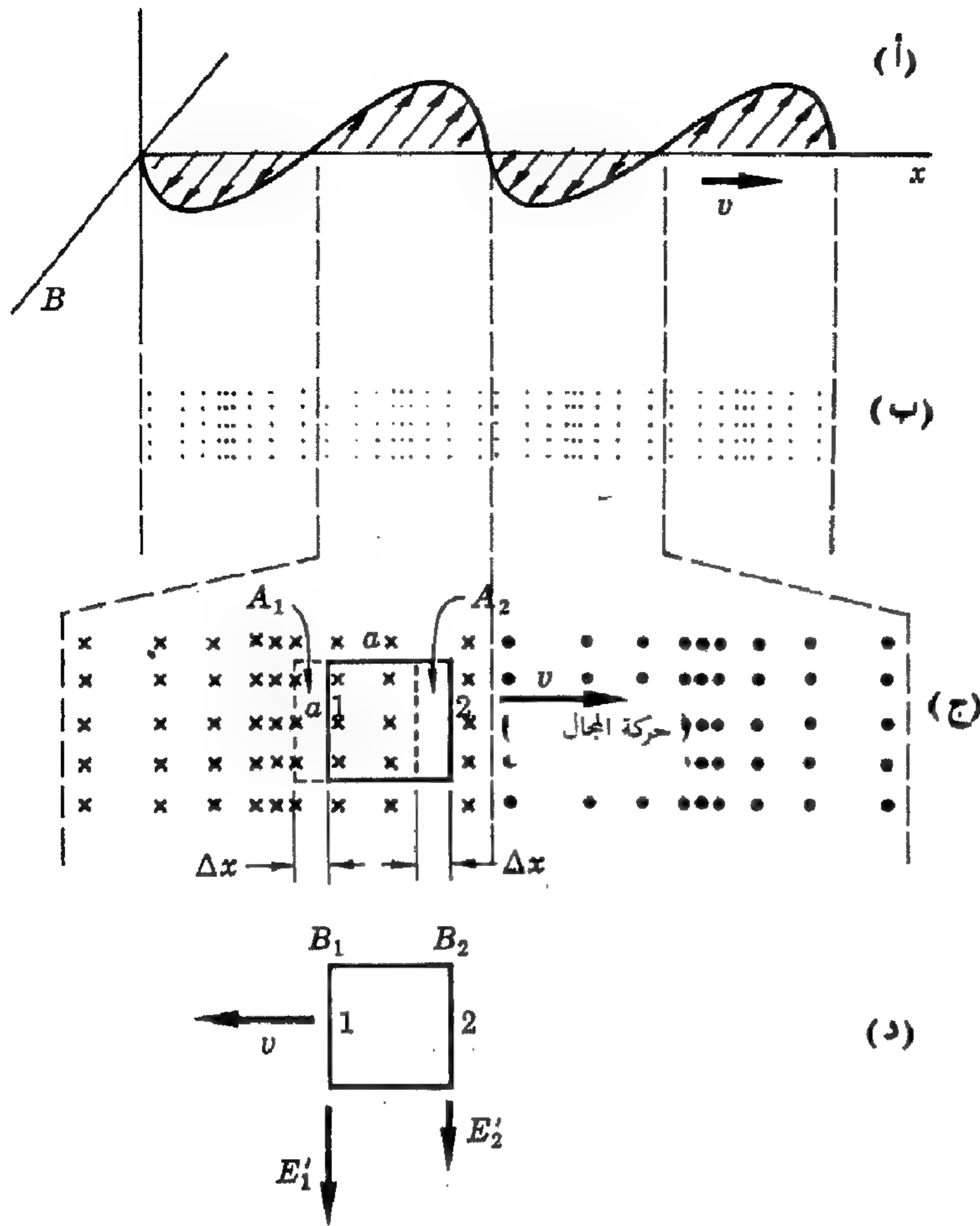
٢٢ - ٨ العلاقة بين E و B في الأمواج الكهرمغناطيسية *

سنستخدم في هذا القسم قانون فاراداي الخاص بـ ق.د.ك المنتجة بالحث وذلك لنحصل على علاقة بين شدة المجال الكهربائى E وشدة المجال المغناطيسى B في موجة كهرمغناطيسية . لنحصر انتباهنا أولاً في جزء المجال المغناطيسى من الموجة المنتشرة على طول المحور x . ويوضح الشكل ٢٢ - ٢٢ أ « لقطة » لهذه الموجة عند لحظة معينة وذلك على شكل رسم بياني أما مقطع الموجة ففي الجزء (ب) . نعلم من الأقسام السابقة أن هذه الموجة تنتقل خلال الفراغ - وفي حالتنا هذه الى اليمين على طول المحور x . وبانتقال المجال المغناطيسى الى اليمين ، فإنه يسبب تغيراً في التدفق المغناطيسى خلال اطار كالموضح في الجزء (ج) من الشكل . وقد افترض أن الاطار له مقاومة لا نهائية بحيث لا يمر تيار خلاله . سنقوم الآن بحساب ق.د.ك المنتجة بالحث في هذا الاطار بطريقتين ومن ثم نحصل على معلومات تتعلق بالموجة (ك.م) .

اعتبر الآن ما يحدث للتدفق خلال الاطار في شكل ٢٢ - ٢٢ ج خلال الفترة القصيرة Δt التى تستغرقها الموجة لكى تنتقل مسافة صغيرة Δx (نشير الى هذه الاراحة في الشكل بالاشارة الى وضع الاطار الجديد « على الموجة » على انه هو المساحة المزاحة داخل الخطوط المنقطعة . وبالتطبع فإن الاطار يظل في الحقيقة في نفس المكان والموجة هى التى تتحرك) بما أن المسافة Δx هى في الحقيقة أصغر بكثير عما هى عليه في الرسم فإن قيمة B داخل المساحة المستطيلة A_1 هى بالتقريب B_1 وتبلغ B_2 في A_2 . عند تحرك الموجه فإن التدفق خلال المساحة A_2 وبالتحديد $B_2 A_2$ قد فقد من الاطار بينما التدفق خلال A_1 قد اكتسب وعليه يصبح لدينا :

$$\Delta \phi = \text{كسب التدفق خلال الاطار} = B_1 A_1 - B_2 A_2 \quad (٢٢ - ١)$$

* الاقسام من ٢٢ - ٨ إلى ٢٢ - ١٠ يمكن تجاوزها دون فقد السياق .



شكل ٢٢ - ٢٢
يوضح الجزءان (أ) ، (ب) أن القسم المغناطيسي من الموجة الكهرومغناطيسية عند لحظة معينة يتحرك الى اليمين بسرعة v حدثت في (ج) ازاحة الاطار الى اليسار على طول الموجة وذلك حين انتقلت الموجة الى اليمين ويستحث هذا مجالات كهربائية E_1' ، E_2' كما هو مبين في (د)

على أن كل من A_1 و A_2 مساو للكمية $a \Delta x$ ولكن حيث أن Δx هي مجرد المسافة التي تنتقلها الموجة في زمن مقداره Δt فان Δx تعطى بالكمية $v \Delta t$ حيث v هي سرعة الموجة . بالتعويض عن هذه الكمية في المعادلة (٢٢ - ١) نجد ،

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = av(B_1 - B_2) \quad \text{أو} \quad \Delta \phi = (B_1 - B_2)v \Delta t a$$

وحسب قانون فاراداي فان هذه الكمية هي ببساطة ق.د.ك المتجة بالحث في الاطار ومن ثم ،

$$\text{ق.د.ك} = av(B_1 - B_2) \quad (٢٢ - ٢)$$

ويمكنك بسهولة اثبات أن ق.د.ك تتجه ضد عقارب الساعة في الاطار .

لنحسب الآن ق.د.ك بطريقة أخرى . افترض أننا كنا ننتقل فعلا مع موجة (ك.م) خلال الفراغ أى أن الموجة ستكون ساكنة بالنسبة لنا ، أى فى مناط اسنادنا وهذا يكون المجال المغناطيسى ايضا ساكنا ولا يتغير . ولكن الاطار سيبدو كما لو كان متحركا الى اليسار بسرعة v فى الشكل ٢٢ - ٢٢ ح . وكما تعلمنا فى الفصل العشرين فان السلكين 1 ، 2 سيكون بين اطرافها فرق للجهد نتيجة لحركتهما خلال المجال المغناطيسى . تتعرض الشحنات الموجبة فى السلكين لقوة تنجبه الى الطرف الأسفل للسلك وذلك بسبب حركتهما فى المجال وهذا تكون ق.د.ك المنتجة بالحث متجهة الى الطرف الأسفل من الأسلاك . وتفيدنا المعادلة (٢٠ - ٧) بأن ق.د.ك المنتجة بالحث فى سلك طوله a هى Bva . ولما كانت ق.د.ك. المنتجين بالحث فى السلكين 1 ، 2 تعاكس كل منهما الأخرى فى الاطار ، فان ق.د.ك المنتجة بالحث فى اتجاه ضد عقارب الساعة داخل الاطار تكون

$$Q.D.K = av(B_1 - B_2) \quad (22 - 3)$$

وهى مطابقة للنتيجة التى توصلنا اليها فى المعادلة (٢٢ - ٢)

تتضح أهمية الحسابات التى أدت الى المعادلة (٢٢ - ٣) حين نعتبر حقيقة أن ق.د.ك المنتجين بالحث فى السلكين 1 ، 2 هما نتيجة للقوى المؤثرة على الشحنات الموجبة فى السلكين . وحيث أن ق.د.ك او فرق الجهد عبر السلك هو القوة المؤثرة على وحدة الشحنات الموجبة ، أى E مضروبة فى طول السلك ، فان

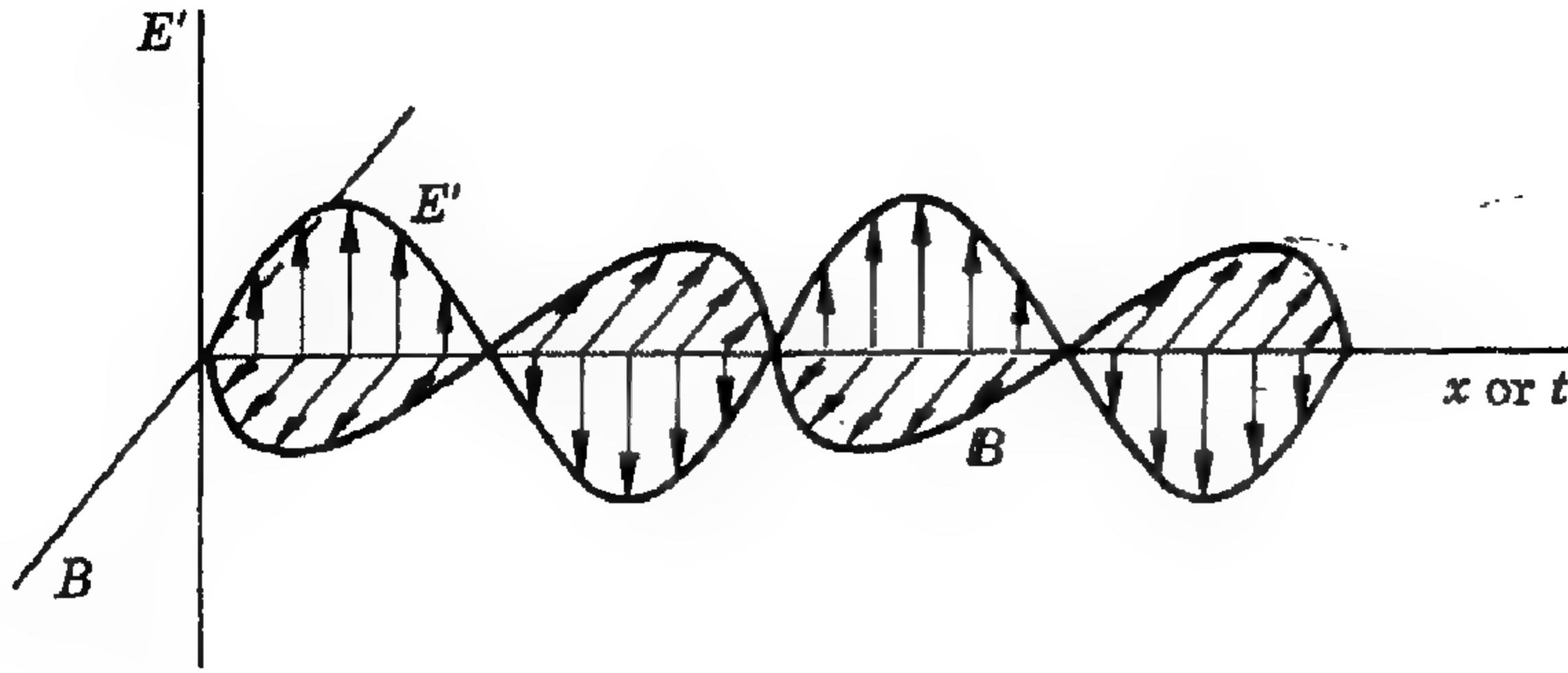
$$aE'_2 = avB_2 \quad \text{و} \quad aE'_1 = avB_1$$

أو

$$E'_2 = vB_2 \quad \text{و} \quad E'_1 = vB_1 \quad (22 - 4)$$

حيث يوضح الشكل ٢٢ - ٢٢ (د) اتجاه كل من E'_1 ، E'_2 ومن هنا نرى أن مجالا مغناطيسيا B يتحرك بسرعة v يؤدي الى ظهور مجال كهربائى E' عمودى عليه ، وقيمة E' تتناسب مع قيمة B وتعطى بالمعادلة $E' = vB$

يمثل الشكل ٢٢ - ٢٣ اعادة لرسم موجة B الاصلية التى كانت فى الشكل ٢٢ - ٢٢ . بحيث رسم على نفس الشكل المجال الكهربائى E' المنتج بالحث وذلك باستخدام النتائج التى توصلنا اليها منذ قليل ، وحيث أن $E' = vB$ فيصبح على كلا المجالين أن يصلا الى قيمتهما العظمى معا ويصلان للصفر معا أيضا . وعلى الرغم من انهما متعامدين الا انهما متطاورين تماما . ومن الواضح أن هناك تشابها بين هذا الشكل وذلك المبين فى الشكل ٢٢ - ٢٠ لموجه (ك م) وهذا يقودنا الى الشك فى



شكل ٢٢ - ٢٣
الجزء المغناطيسي من موجة
(ك.م) تنتقل الى اليمين ويقوم
بتوليد موجة مجال كهربائي E'
كما هو مبين

أن جزء المجال الكهربائي من موجة (ك.م) قد تولد - بشكل ما على الأقل - بواسطة جزء المجال المغناطيسي من الموجه وهي تنتقل خلال الفراغ ، وسيجد هذا الشكل تأكيداً أقوى من النتائج التي سنحصل عليها في القسم التالي .

٢٢ - ٩ المجالات المغناطيسية المستحثة بتغير المجالات الكهربائية

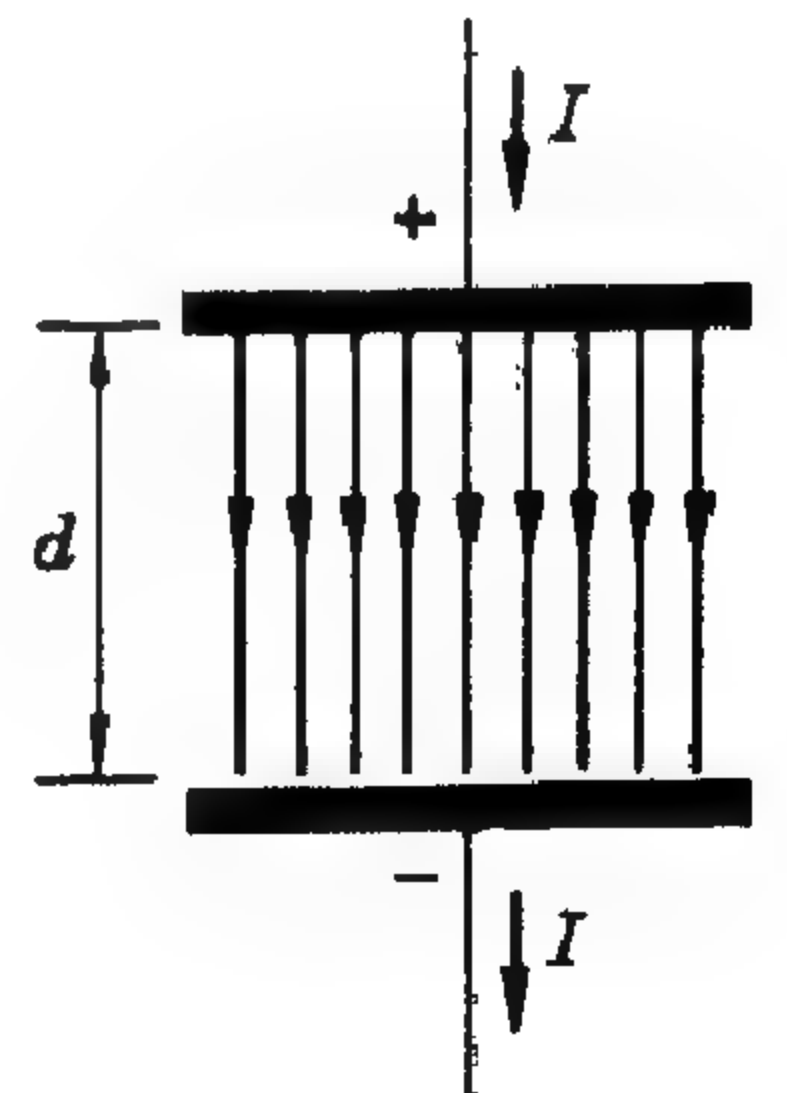
رأينا في القسم السابق أن جزء المجال المغناطيسي من موجة (ك.م) يولد مجالاً كهربائياً ينتقل معه دائماً ، وهذا مثال آخر على قانون فاراداي للحث الذي ينص على أن المجال المغناطيسي المتغير يمكن أن يؤدي إلى ظهور ق. د. ك. مما يعني تولد مجال كهربائي أثناء العملية . وحيث أن المجال المغناطيسي المتغير يؤدي إلى مجال كهربائي فإنه يصبح من حقنا التساؤل عما إذا كان المجال الكهربائي المتغير يؤدي هو الآخر إلى مجال مغناطيسي . وهذا يعني أن المجال الكهربائي لابد وأن يعمل كتيار وذلك لأن كل المجالات المغناطيسية التي قابلناها حتى الآن كانت متولدة من حركة الشحنة . لهذا سنبحث أثر المجال الكهربائي المتغير لنرى كيف يمكنه أن يسلك سلوك تيار .

يبين الشكل ٢٢ - ٢٤ موقفاً فيزيائياً يوجد بين مجال كهربائي وتيار بطريقة مباشرة فالسلك المبين هناك وهو مستقيم وطويل يحمل تياراً I إلى المكثف ويقوم بشحنه . ومن الطبيعي ألا يستمر هذا التيار طويلاً ، لأن التيار يجب أن يضمحل إلى الصفر حينما تكتمل شحنة المكثف . ولكن التيار يكون I في لحظة ما أثناء عملية الشحن . وسنتأقش ما يحدث عند تلك اللحظة . وسنتجاهل التأثيرات التهدبية عند حافة المكثف وسنعتبر أن E ، المجال الكهربائي ، منتظماً بين اللوحين .

حيث أن فرق الجهد بين اللوحين هو Ed كما رأينا في الفصل السادس عشر ، وحيث أن الشحنة Q على مكثف سعته C تعطى بالعلاقة $Q = CV$ فإنه عند لحظة معينة يكون لدينا :

$$Q = CE d$$

شكل ٢٢ - ٢٤
يتسبب التيار I الذي يشحن
المكثف في تيار مكافئ
خلال الحيز بين اللوحين كما
هو مبين ، وهذا التيار
المكافئ يتناسب مع معدل
تغير التدفق الكهربائي المار بين
اللوحين .



وبعد فترة Δt ستصبح الشحنة $Q + \Delta Q$ أما المجال فسيزيد الى $E + \Delta E$ ومن ثم :

$$Q + \Delta Q = C(E + \Delta E)d$$

ب طرح المعادلة الأولى من الثانية نصل الى :

$$\Delta Q = C \Delta E d$$

إذا قسمنا كلا الطرفين على الزمن الذى استغرقه التغير Δt ، وأحللنا مكان C قيمتها المعطاة في الفصل السابع عشر وهى $\epsilon_0(A/d)$ حيث A مساحة اللوح ϵ_0 هى مجاوزية الفراغ الحر وتساوى $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N})(\text{m}^2)$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon_0 A \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{فنجد أن} \quad (22 - 5)$$

وحيث أن E يمكن تصورهما على أنها عدد خطوط المجال الكهربائي في وحدة المساحات بنفس الطريقة التى تكون فيها B هو عدد خطوط المجال المغناطيسى خلال وحدة المساحات ، فإن المقدار AE يسمى دائما تدفق E خلال مساحة معينة ويرمز له بالرمز ϕ_E والرمز السفلى E ضرورى حتى لا يحدث خلط بين التدفق الكهربائي والتدفق المغناطيسى $\phi = BA$ وعلى أية حال فإن $A \Delta E$ هو التغير في التدفق الكهربائي خلال مساحة المكثف ولهذا يمكن كتابة المعادلة (22 - 5) على الصورة التالية :

$$I = \epsilon_0 \frac{\Delta \phi_E}{\Delta t} \quad \text{تكافؤ تدفق كهربائي متغير و تيار} \quad (22 - 6)$$

حيث أستفيد من الحقيقة القائلة بأن التيار هو $\Delta Q/\Delta t$

تشير المعادلة (22 - 6) الى أن التدفق الكهربائي المتغير والناشئ عن مجال كهربائي متغير يكافئ تيارا حقيقيا ينتقل في السلك ولهذا نستدل على مايلي :

يؤدى المجال الكهربى المتغير الى تيار مكافئ يمكن الحصول على قيمته من المعادلة (22 - 6) . ويقوم هذا التيار المكافئ بدوره بتوليد مجال مغناطيسى مثلما يفعل ذلك أى تيار حقيقى ، ولايجاد ذلك المجال المغناطيسى يمكن استخدام قانون أمبير للدوائر الذى نوقش في الفصل التاسع عشر ، حيث وجد أنه لو اخترنا مساراً مقفلاً يبلغ طوله الكلى $l = l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n$ فإن المعادلة التالية تنطبق :

$$\Sigma(B_{\parallel}l)_n = (\mu_0) \quad \text{(كل التيار المحاط بمسار مقفل)}$$

يجب أن يكون المسار مكونا من الاطوال l_1, l_2, \dots, l_n بحيث ان $B_{||}$ تكون بالضرورة ثابتا في كل طول . تدل الجهة اليسرى من هذه المعادلة على أننا أخذنا مركبة B الموازية لكل طول ثم نضربها في الطول ثم نجمع كل هذه الحاصلات لكل الاطوال التي تكون العروة أو المسار المقفل . يساوى هذا المجموع كل التيار الذي يسرى خلال العروة مضروبا في μ_0 ، نستدل مما قيل بالنسبة للتيارات المكافئة الناتجة من تغير المجالات الكهربائية ان التيارات المكافئة يجب أن تؤخذ هي الأخرى في الاعتبار عند كتابة التيار المحاط بالعروة .

ان افتراض التدفق الكهربائي يعمل تماما مثل تيار له قيمة تعطى بالمعادلة (٢٢ - ٦) ويسرى في نفس الاتجاه ، يعتبر أحد الفروض الأساسية التي قدمها ماكسويل عند كتابة معادلاته الشهيرة . وقد كانت مبرراته لعمل هذا الفرض غاية في البساطة : لم يكن ممكنا التوفيق بين نتائج معادلاته ونتائج التجارب بدون هذا الفرض . وعلى الرغم من أنه أعطى هذا الفرض تبريرا حدسيا ، كما ذكرنا ، فإنه بالتحليل الأخير لا يمكن تبرير الفرض الا باختباره بالتجربة وحدها .

وقد كانت السرعة المقاسة للضوء هي النتيجة التجريبية التي أعطت ثقلًا كبيرا في تبرير مبدأ التيار المكافئ . وسرعة الضوء يمكن التنبؤ بقيمتها بدقة باستخدام مبدأ التيار المكافئ . وسنقوم بعرض إحدى الطرق لعمل هذا في القسم التالي :

٢٢ - ١٠ سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية

لنعتبر حركة جزء المجال الكهربائي في موجة (ك م) خلال الفراغ وسنتبع نفس الأسلوب الذي استخدم من قبل في القسم ٢٢ - ٩ عند تطبيق قانون الحث لفاراداي على جزء المجال المغناطيسي للموجة . ولأشك أننا نذكر اننا وجدنا هناك أن المجال المغناطيسي B قد ولد بمجالا كهربائيا E' وان كلا المجالين ارتبط بمعادلة هي :

٢٢ - ٧

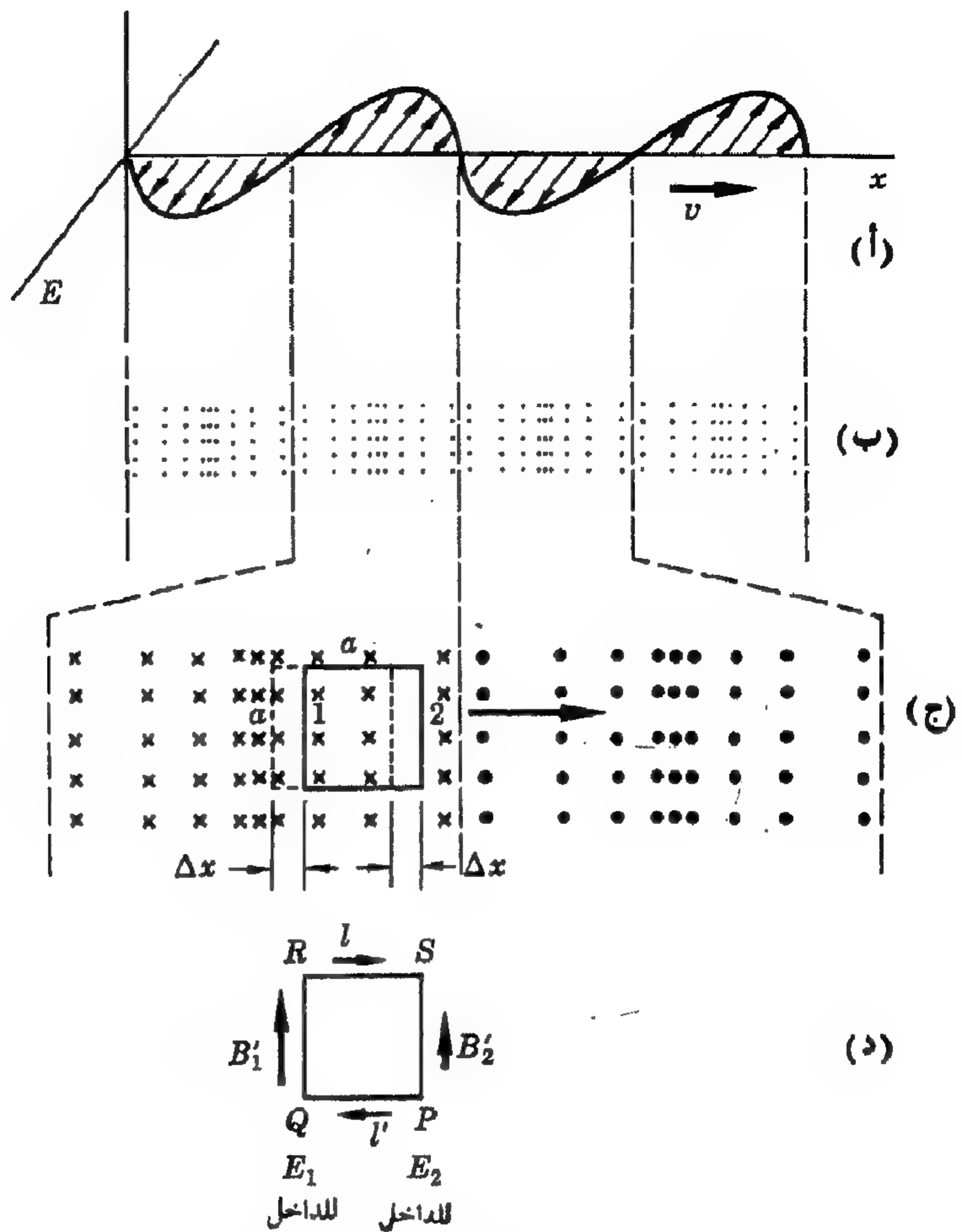
$$E' = vB$$

حيث v هي السرعة التي تنتقل بها الموجة .

يبين الشكل ٢٢ - ٢٥ رسما بيانيا للمجال الكهربائي عند لحظة معينة على طول محور x وقد بيناه في مستوى افقى بدلا من الرأسى حتى تتمكن من تمثيله بصورة افضل في اجزاء اخرى من الشكل .

ويفترض ان الموجة تنتقل الى اليمين بسرعة v ويوضح الجزء (ب) مقطعا لموجة المجال الكهربائي ثم مكبرة في الجزء (ج) . ونريد الان ان نعتبر التغير في التدفق الكهربائي خلال الاطار المستطيل الموضح في الجزء (ح) عند انتقال الموجة عبره الى اليمين ماذا ما فسرنا

شكل ٢٢ - ٢٥
ينتقل جزء المجال الكهربائي
لموجة كهرومغناطيسية الى اليمين
في (أ) ، (ب) عبر الاطار
المبين في (ج) ونتيجة لهذا
ينزاح الاطار الى اليسار على
الموجة كما هو مبين . يؤدي
التغير في التدفق الكهربائي
خلال الاطار الى وجود تيار
مكافئ ويولد هذا التيار مجالا
مغناطيسيا بجوار الاطار



هذا التغير على أنه تيار مكافئ فاننا نطبق قانون أمبير للدوائر على الاطار المعطى في محاولة لايجاد المجال المغناطيسي .

سنتقل الموجه التي تتحرك الى اليمين بسرعة v مسافة قدرها $v \Delta t$ خلال الفترة Δt وبعد هذه الفترة سينزاح الاطار الى اليسار مسافة قدرها $\Delta x = v \Delta t$ على الموجه كما هو مبين بالموقع المنقط في الجزء (ج) من الشكل . وخلال هذه العملية ، تفقد كمية مقدارها $(a \Delta x) E_2$ من التدفق وذلك من الناحية اليمنى للاطار وتكتسب كمية $(a \Delta x) E_1$ من الناحية اليسرى . ويكون التغير الخالص في التدفق هو

$$\Delta \phi_E = (a \Delta x) E_1 - (a \Delta x) E_2 = (av \Delta t)(E_1 - E_2)$$

حيث استبدل بالكمية Δx المقدار $v \Delta t$ اما التيار المكافئ فهو ما يعطى بالمعادلة

$$I = \epsilon_0 \frac{\Delta \phi_E}{\Delta t}$$

أو

$$I = \epsilon_0 av(E_1 - E_2)$$

(٢٢ - ٨)

سيكون هذا هو التيار المحاط بالاطار وهو التيار الذى يستخدم فى قانون أمبير للدوائر .

بالرجوع الى الجزء (د) من الشكل ٢٢ - ٢٥ فاننا سنقوم بجمع الحاصلات $(B_{||}/l)_n$ بادئين عند Q ومتحركين مع عقارب الساعة خلال Q, R, S, P ثم نعود الى Q مرة أخرى . وحيث ان E ثابت عند كل النقط الواقعة على الخط الذى يعتبر QR جزءا منه لذا فالمجال المغناطيسى المستحث على طوله يكون أيضا ثابتا ، وهو B'_1 اما المجال المغناطيسى على طول SP وهو ثابت بالمثل فسنرمز له بالرمز B'_2 . ولما كان الجانب PQ والجانب RS للاطار معرضين لمجالات كهربائية متشابهة ، فان قيم B ستكون أيضا متطابقة على طول هذين الجانبين . على أنه يجب ملاحظة أنه عند جمع متجهات الاطوال - اثناء تقدمنا حول الاطار مع عقارب الساعة - فان المتجهات التى تكون الجانب RS ستكون متعاكسة مع تلك التى على الجانب PQ ولما كان B' يقع فى نفس الاتجاه لكل من الجانب الاعلى والجانب الاسفل ، لذا فهو مواز للتيار I' عند الجانب الاعلى ومتواز ومتضاد عند الجانب الاسفل فى النقطة المناظرة . وعلى هذا ، عند كتابة قانون امبير للدوائر ستكون كل كمية $(B_{||}/l)_n$ على الجانب الاعلى من الاطار ملغاة بكمية متساوية ومتضادة من الجانب الاسفل للاطار .

حيث ان $(B_{||}/l)_n$ من الجانب الاعلى للاطار تلغى تلك التى من الجانب الاسفل فان المجموع فى قانون امبير للدوائر يؤول الى $B'_1 a - B'_2 a$ وبمساواة هذه الكمية بالمقدار μ_0 مضروبة فى التيار المحاط نجد ان

$$B'_1 a - B'_2 a = \epsilon_0 \mu_0 a v (E_1 - E_2)$$

فاذا حللنا للحصول على $E_1 - E_2$ نحصل على

$$(22 - 9) \quad E_1 - E_2 = \frac{B'_1}{\epsilon_0 \mu_0 v} - \frac{B'_2}{\epsilon_0 \mu_0 v}$$

لو أن قيم المجال الكهربائى E_1 و E_2 كانت صفرا ، أى لو لم يكن هناك مجال ، لما كان هناك تيار مكافئ ولكانت كل من B'_1 و B'_2 صفرا . علاوة على هذا ، لو كان الاطار طويلا جدا بحيث كان الجانب QR فى منطقة يوجد بها مجال كهربائى بينا SP يقع فى منطقة يكون فيها E_2 صفرا بحيث يكون كل من B'_2 و E_2 صفرا ، وعندئذ يكون لدينا - من المعادلة (22 - 9)

$$E_1 = \frac{B'_1}{\epsilon_0 \mu_0 v}$$

ولكن بما أن الجانب QR كان من الممكن اعتباره في أى مكان ، فإن هذه العلاقة تعتبر عامة لأيّة نقطة وليس للنقطة التى يكون فيها E هو E_1 ومن ثم نصبح فى حل من اسقاط الرموز السفلية فى المعادلة وكتابتها بشكل عام كما يلى ،

$$E = \frac{B'}{\epsilon_0 \mu_0 v} \quad (٢٢ - ١٠)$$

تفيد المعادلة (٢٢ - ١٠) بأن جزء المجال الكهربائى المتحرك من موجة (ك . م) يقوم بتوليد مجال مغناطيسى « فتدقق المجال الكهربائى المتدفق يكافئ تيارا ، وهذا التيار المكافئ هو الذى يولد المجال المغناطيسى . بالرجوع مرة أخرى الى الشكل ٢٢ - ٢٥ (جـ) و (د) نجد أن التدفق الكهربائى يزيد متجها لداخل الصفحة عند تحرك الموجة الى اليمين (أو عند تحرك الاطار الى اليسار) ويكافئ هذا تيارا متجها الى داخل الصفحة ، وحسب قاعدة اليد اليمنى يكون المجال المغناطيسى مؤثرا بشكل أساسى مع عقارب الساعة حول الاطار . ولما كان E_1 أكبر من E_2 فإن المعادلة (٢٢ - ١٠) تفيد بأن B'_1 يجب أن يكون أكبر من B'_2 كما هو موضح فى الشكل . ويكون اتجاه كل من B'_1 و B'_2 بالضرورة الى أعلى وذلك لأن B' يجب أن تؤثر مع عقارب الساعة حول لاطار . لو أننا قارنا الاتجاه النسبى بين B' و E_1 لوجدناه كما هو مبين فى الشكل ٢٢ - ٢٣ بين B ، E' (تذكر أنه عند رسم ٢٢ - ٢٥) فأننا أدركنا مستوى متجهات E عموديا على مستوى الصفحة لسهولة الرسم ، فعند عمل المقارنة يجب أن نتخيل - ذهنيا - أننا أدركنا الطرف الأسفل للاشكال 90° خارجا من الصفحة) . ومن ثم فإن الشكل ٢٢ - ٢٣ يكون قابلا للتطبيق فى حالة العلاقة التى أوجدناها بين E و B' .

والمقارنة بين الحالة الراهنة وتلك التى عولجت من قبل تتضح عند الرجوع الى المعادلات التى نتجت بكل من الحالتين ، فقد وجدنا سابقا أن الجزء المغناطيسى B من موجة كهرومغناطيسية قد ولد مجالا كهربائيا E' معطى بالعلاقة ،

$$E' = vB \quad (٢٢ - ٧)$$

ونجد الآن أن جزء المجال الكهربائى E يولد مجالا مغناطيسيا B' معطى بالعلاقة ،

$$E = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 v} B' \quad (٢٢ - ١٠)$$

وفى كلتا الحالتين يكون E' و B وكذا E و B' متطاورين ويكون الاتجاه النسبى للمجالات متطابقا . وهذا يعنى بالضرورة أن B' متطابق مع B من حيث الاتجاه والطور . وبالمثل ، يتطابق كل من E ، E' فى الاتجاه والطور . ويكون السؤال الملح

الآن هو : هل E و E' هما نفسيهما من حيث التطابق وهل B و B' هما أيضا نفس الشيء ؟ لقد أوضحنا فعلا تطابقهما في الاتجاه والطور ، فلو أن المقادير أيضا كانت متطابقة فإن اجابة السؤال تصبح « نعم » .

دعنا نفترض للحظة أن E و E' وكذا B و B' يمثلان نفس الشيء بقسمة المعادلة (٢٢ - ٧) على المعادلة (٢٢ - ١٠) ينتج أن

$$\frac{E}{E'} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 U^2} \frac{B'}{B}$$

بازالة E مع E' وكذا B مع B' نجد أن ،

$$1 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 U^2}$$

ويحل المعادلة للحصول على U نجد ،

$$U = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (٢٢ - ١١)$$

بوضع القيم المعينة تجريبيا للمقادير $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$
 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N})(\text{m}^2)$

$$U = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \text{نجد أن}$$

وهي مساوية لسرعة الضوء* المقاسة .

هذه النتيجة حقا مذهلة .. لقد استخدمنا قانون الحث لفاراداي مع مبدأ ماكسويل للتيار المكافئ وذلك لايجاد سرعة أمواج (ك . م) وقد اتضح أن هذه هي سرعة الضوء المقاسة . وقد قمنا أثناء ذلك بفرض أن المجال الكهربائي المولد من تغير المجال المغناطيسي كان فعلا الجزء الكهربائي من موجة (ك م) . وبالمثل قام جزء المجال الكهربائي المتغير من موجة (ك م) بحث مجال مغناطيسي تحت مطابقتها مع الجزء المغناطيسي من الموجة (ك م) . بمعنى آخر لقد افترضنا أن موجة (ك م) تولد نفسها أثناء انتقالها في الفراغ . وقد قادنا هذا الفرض الى أن نستنتج أن الموجة تنقل بسرعة الضوء . وقد أشارت كثير من التجارب الى صحة هذا الاستنتاج وبهذا تعير اقتراحاتنا التصديق .

لقد كان ماكسويل - كما ذكرنا - هو أول من اكتشف العلاقة المتبادلة بين الضوء والكهرمغناطيسية ، وقد استنتج أن الضوء هو موجة (ك م) وهو استنتاج تم التحقق

* سنرى في القسم التالي أن وحدات الكولوم والأمبير يعرفان الآن بافتراض أن هذا صحيح تماما .

منه خلال السنوات التي تلت ذلك على نطاق واسع . على الرغم من أن أمواج اللاسلكى لم تكن قد اكتشفت حتى الوقت الذى مات فيه ماكسويل (١٨٧٩) الا أن هاينريش هيرتز (١٨٥٧ - ١٨٩٤) كان قد نجح فى توليد أمواج (ك م) غير الضوء عام ١٨٨٧ وقد ثبت فيما بعد أن هذه الأمواج تنتقل بسرعة الضوء وبذا تم تبرير تنبؤ ماكسويل بشكل كامل ونهائى .

٢٢ - ١١ تعريف الوحدات الكهربائية

لقد تعلمنا فى الأقسام السابقة الحقائق الهامة التالية :

١ - تنتقل الأمواج (ك م) عبر الفراغ بسرعة $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ والقيمة العددية لها $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

٢ - يكون كل من E و B متعامدين فى موجة (ك.م) فى الفراغ . والعلاقة بينهما هي $E = cB$

وقد أصبحنا على استعداد لأن ننص بدقة على التعريفات الخاصة بالكميات التي كنا نستعملها أثناء دراستنا للكهرية وقد كان سبب التأخير هو أن سرعة الضوء المعبر عنها بدلالة ϵ_0 ، μ_0 هي أساس هذه التعريفات . وحيث أننا قد بينا أن السرعة c لاشعاع ك م فى الفراغ هي $\sqrt{1/\epsilon_0\mu_0}$ فاننا نستطيع استخدام هذه الحقيقة لتعريف قيم ϵ_0 و μ_0

قيم ϵ_0 و μ_0

تعرف ، انفاذية الفراغ الحر μ_0 بطريقة اختيارية على أنها $4\pi \times 10^{-7} \text{ N}^2\text{s}^2/\text{C}^2$ وباستخدام هذه القيمة يمكننا تعريف ϵ_0 بدلالة القيمة المقاسة لسرعة الضوء c . ولهذا فحيث أن ،

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$$

$$c^2 = 1/\epsilon_0\mu_0 = (2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

فان لدينا ،

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N})(\text{m}^2)$$

لكي نعرف وحدة التيار ، الأمبير ، سنستعين بحقيقة أن سلكا يحمل تيارا فى مجال مغناطيسى سوف يتعرض لقوة . فاذا اعتبرنا سلكين طويلين متوازيين ومستقيمين يمر بهما نفس التيار I ، فان السلكين سيتعرضان لقوى نتيجة لوجود كل منهما فى المجال المغناطيسى للآخر . وحين تكون المسافة بين السلكين هي d فان المجال المغناطيسى عند أحدهما ، نتيجة لمرور التيار فى الآخر يكون ببساطة هو ،

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

كما وجدنا من قبل في المعادلة (١٩ - ٦) وسيكون المجال عموديا على السلك الثانى وبهذا تكون القوة المؤثرة على طول قدره L من السلك هى :

$$F = BIL$$

أو، بعد التعويض عن B والقسمة على L ،

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi d}$$

بما أن القوة المؤثرة على وحدة الأطوال من السلك ، F/L يمكن قياسها وكذلك المسافة بين السلكين ، فإن التيار I يمكن حسابه بدلالة الكميات المعروفة ، فحين تقاس F بوحدات نيوتن ، وحين تعطى μ_0 قيمتها $4\pi \times 10^{-7} \text{ N.s}^2/\text{c}^2$ فإن التيار يكون بالوحدات التى نعرفها بأنها الأمبير . ومن ثم فالأمبير يعرف مباشرة بدلالة القوة والطول وكلاهما وحدات أساسية .

الوحدات الكهربائية

يعرف كولوم الشحنة بأنه الشحنة المحمولة خلال مقطع من سلك ما فى ثانية واحدة حين يكون التيار فى السلك أمبير واحد . ونتيجة لهذا يعتمد تعريف الكولوم مباشرة على نفس القياسات التى استخدمت لتعريف الأمبير .

لتعريف وحدة كثافة الفيض ، B ، نستخدم العلاقة ،

$$F = B_{\perp} IL$$

فاذا حمل سلك طوله 1m تيارا مقداره 1A عموديا على مجال مغناطيسى وكانت القوة المؤثرة على السلك 1N فإن قيمة كثافة الفيض B تكون حسب التعريف ، 1T (أو $1\text{N.s}/(\text{c})(\text{m})$ أو Wb/m^2)

وقد تم فعلا تعريف الكميات الأخرى التى تستخدم فى الكهربائية وذلك بدلالة الكميات المعروفة آنفا مع وحدات القوة ، الطول ، الزمن ، ولن نقوم بتكرارهم جميعا هنا . ولكن تجدر الإشارة أننا لنجرب فى تعريف كل الوحدات الكهربائية بدلالة تجارب محددة تضمنت قياس القوة والطول والزمن . ونتيجة لهذا سيتمكن كل شخص يحاكى وحدتنا لهذه الكميات الأساسية الثلاثة أن يحاكى أيضا وحدتنا الكهربائية .

ملخص

حين نحى المواد الى درجة الايضاض فان الالكترونات « تتبخّر » منها في عملية تسمى الابتعاث الترميوني . ويكون لدى أكثر الالكترونات نشاطا ما يكفى من الطاقة الحرارية لكى تمدها بدالة الشغل ، أى الطاقة اللازمة لانتزاع الكترون من المعدن ليصبح طليقا

يقوم كل من الصمام الثنائى الترميوني والصمام الثنائى فى الحالة الصلبة بتوصيل التيار فى اتجاه واحد فقط ونتيجة لهذا يمكن استخدامها لتحويل الجهود والتيارات المترددة الى جهود والتيارات مستمرة . تستخدم نبضات الكترونيات الحالة الصلبة موادا شبه موصلة . تكون الالكترونات فى المواد سالبة النوع هى حاملات التيار اما فى المواد موجبة النوع فان حاملات التيار تكون الفجوات الالكترونية المسماة بالفجوات التى تعمل كحاملات موجبة الشحنة .

حين يقوم مذذب بجعل الشحنات المنعكسة تظهر على هوائى الارسال لمحطة اذاعة فان موجة مجال كهربائى ومجال مغناطيسى ترسل من الهوائى . وهذه الموجة الكهرومغناطيسية (ك . م) تتكون من موجتين متعامدتين فيما بينهما احدهما كهربائية والاخرى مغناطيسية . والموجتان متطاورتان وتنتقلان خلال الفراغ بسرعة الضوء $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

هناك أنواع كثيرة من أمواج (ك.م) . وهى تختلف فى أطوالها الموجية ، فأمواج اللاسلكى تبلغ ٨ لها مئات الأمتار . وتندرج الأطوال الموجية فى القصر فنجد أمواج الرادار ثم تحت الحمراء (الحرارة) ، ثم الضوء المرئى ، ثم الضوء فوق البنفسجى فأشعة اكس فأشعة جاما . وتنطى هذه الأمواج مدى أطوال الأمواج يصل الى مادون 10^{-10} m فى جميع امواج ك م يكون $E = cB$ فى الفراغ .

تعرف الوحدات الكهربائية بدلالة سرعة الضوء ، فحسب التعريف $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$ وحيث أن سرعة الضوء تعطى بالمعادلة $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ فان هذه المعادلة تستعمل لتعريف ϵ_0 ويمكن بعد ذلك تعريف باقى الوحدات الكهربائية بدلالة وحدات الكتلة والطول والزمن .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الاتى :

- ١ - أن تعطى شرحا كفييا عن سبب اعتماد الابتعاث الترميوني على درجة الحرارة .
- ٢ - أن تشرح كيف يعمل صمام ثنائى مفرغ وأن تصف استخدامه كمقوم .
- ٣ - أن تصف كيف يمكن صناعة موصل سالب النوع من السيليكون . وأن تكرر هذا بالنسبة لشبه موصل موجب النوع .
- ٤ - أن تشرح بطريقة كيفية سبب وجود التقويم لدى وصلة من النوع الموجب مع السالب (p-n) وأن تعطى رمز ثنائى الحالة الصلبة وأن تبين أى الاتجاهين يسمح بمرور التيار .
- ٥ - أن ترسم دائرة مقوم نصف - موجى وأن تشرح كيف يتم تنعيم خرجه . أن ترسم دائرة مقوم الموجة - الكاملة وأن تشرح مبدأ عملها .
- ٦ - أن تخطط المجالين E و B لموجة ك م . وأن تحسب الطول الموجى لموجة لاسلكى حين يكون تردد محطة الاذاعة معروفا .
- ٧ - أن تضع قائمة بالأنواع المختلفة من أمواج (ك م) حسب تناقص أطوالها الموجية. أن تذكر نوع الأمواج التى ينتمى اليها طول موجى معين .
- ٨ - أن تصف الطريقتين اللتين يتم بهما كشف أمواج اللاسلكى بواسطة جهاز الراديو ، أن تشرح وظيفة دائرة LC فى جهاز الراديو . وأن تشرح كيف يمكن انتقاء محطة اذاعة معينة بواسطة جهاز الراديو .
- ٩ - أن تعطى سرعة أمواج ك م فى الفراغ

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

الابتعاث الثرميوني

صمام ثنائي مفرغ

اشباه الموصلات من النوع الموجب والنوع السالب .

صمام ثنائي الحالة الصلبة

مقوم نصف - موجى ومقوم الموجة الكاملة .

موجة ك م

طيف موجة ك م

سرعة أمواج ك م هي ،

أسئلة وتخمينات

١ - إذا تساوت كل الأشياء الأخرى ، فما هو نوع المادة المفضل لصنع فتيلة صمام مفرغ-أهى ذات دالة الشغل الكبيرة أم ذات دالة

الشغل الصغيرة ؟

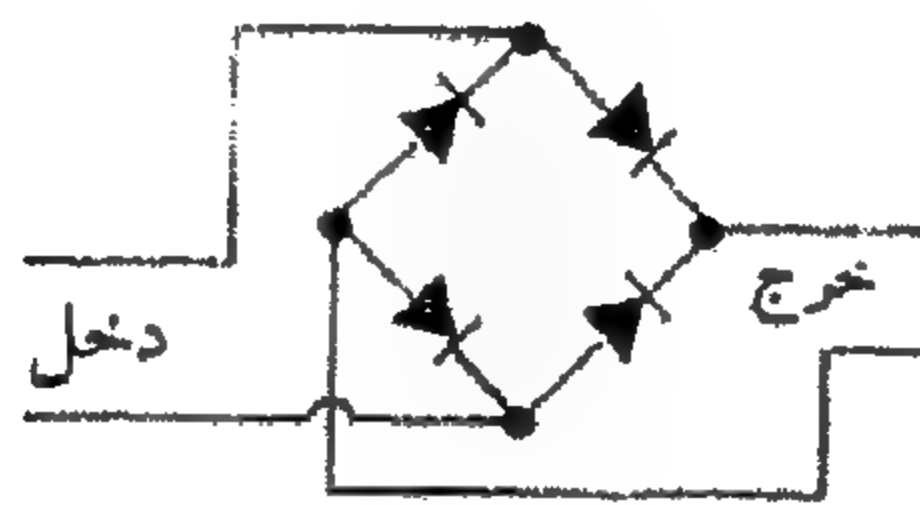
٢ - الدائرة الموضحة في الشكل ٢٢م - ١ هى لمقوم موجة كاملة (يشار اليه عادة على أنه مقوم قنطرى) . افحصه ثم اشرح لماذا كان التيار مقوما ويمر خلال نصفى الموجة .

٣ - يكون هوائى ارسال لبعض محطات الاذاعة رأسيا ولللبعض الآخر أفقيا . صف ثم قارنه أمواج ك م المولدة من هذين النوعين من الهوائيات . كيف - على وجه الخصوص - تكون وجهة B و E بالنسبة لسطح الأرض .

٤ - بالرجوع الى السؤال السابق . اذا فتحت جهاز راديو ترانزستور فانك ترى كيف يكوّن تركيب ملف الهوائى به . كيف يمكنك باستعمال الراديو أن تحدد ما اذا كان هوائى الارسال بالمحطة البعيدة أفقيا أم رأسيا ؟

٥ - تمر الأمواج الكهرومغناطيسية القادمة من معظم محطات الاذاعة فى العالم خلال المنطقة المحيطة بك . كيف يقوم جهاز الراديو أو التلفزيون بالتقاط محطة معينة تود السماع اليها ؟ عندما تدير قرص الراديو فما الذى يحدث بالدخول لالتقاط المحطات المختلفة ؟

شكل ٢٢م - ١



٦ - هناك نوعان من هوائيات الاستقبال فى أجهزة الراديو والتلفزيون ، يلتقط أحدهما الجزء الكهربائى من موجة ك م ويلتقط الآخر المغناطيسى . افحص جهاز راديو ترانزستور للجيب أو جهاز راديو للمنضدة وانظر أى النوعين يستخدم هل من الممكن استخدام النوعين معا ؟

٧ - نرى من وقت لآخر فى السينما او على شاشة التلفزيون بعض الأبطال وهم يحاولون تحديد موقع محطة ارسال سرية وذلك بقيادة سيارة بالقرب منها ويدخل السيارة جهاز متصل به ملف يدور ببطء عند سقف السيارة . اشرح عمل هذا الجهاز .

٨ - يدعى البعض أنه بالقرب من هوائى ارسال لاسلكى قوى يمكن أحيانا رؤية شرارات تفقر على طول سلك بسور مزرعة ما . مارأيك فى هذا الادعاء ؟

- ٩ - يتعرض الطعام والأواني في مواقد الأمواج الدقيقة لأمواج رادار (ك م) عالية التردد جدا . اذا تركت مغلقة بداخل مثل تلك المواقد فانها تسخن بدرجة عالية . ما الذى يجعلها تسخن ؟ هل يمكنك شرح عملية التسخين بدلالة الجزء الكهربائى من الموجة ؟ ام بدلالة المغناطيسى ؟ كيف تسخن المواد غير المعدنية داخل الموقد ؟ هل يمكن لطبق زجاجى أن يسخن فى مثل ذلك الموقد ؟
- ١٠ - هناك بعض الشك حول سلامة الانسان اذا تعرض لأمواج لاسلكى أو أمواج دقيقة عالية الشدة . لماذا يتوقع أن تعتمد درجة الخطر على تردد الأمواج ؟ ما الذى تتوقعه أن يكون أشد خطرا (اذا كان هناك خطر) اللاسلكى أم الأمواج الدقيقة ؟

مسائل

- ١ - تصل درجة حرارة فتيلة محمات لدرجة الابيضاض داخل مصباح اضاءة أو صمام مفرغ الى حوالى 2500°K (أ) ما هى طاقة الحركة المتوسطة لالكترون بالفتيلة ؟ (ب) قارن هذا بدالة الشغل فى التنجستن وهى حوالى 4.5eV
- ٢ - باعتبار أن الكترونات التكافؤ فى معدن ما على أنها طليقة ما هو متوسط سرعة الكترون فى قطعة من المعدن محمات لدرجة الابيضاض عند درجة حرارة 2500 K ؟
- ٣ - ** باعتبار انه يوجد الكترون واحد حر لكل ذرة (أ) أوجد ضغط الغاز الالكترونى داخل كتلة من النحاس عند درجة حرارة 300 K (ب) قارن هذا بالضغط العيارى للهواء . (كثافة النحاس 8.92g/cm^3 والكتلة الذرية $= 63.5$)
- ٤ - يتصل نظام مقوم موجه - كاملة بمقاوم $50,000\ \Omega$ على هيئة حمل له ويقوم بتقويم جهد متردد 60 Hz (أ) ما هى قيمة مكثف الترشيح الواجب استعماله (كما فى شكل ٢٢ - ١٠) اذا كان ثابت الزمن لنظام المرشح - الحمل يبلغ عشرة أضعاف زمن المقوم « بدون تيار » ؟ (ب) لماذا كان من الصعب الحصول على جهد مستمر من نظام تقويم 60 Hz اذا ما أريد سحب تيارات كبيرة منه ؟
- ٥ - لو أن جهد الخرج فى الشكل ٢٢ - ١٠ كانت قيمة العظمى 12.0V وقيمته الدنيا 9.6V فما قيمة التموج لنظام المقوم ؟
- ٦ - تعمل محطة اذاعة WJR فى ديترويت عند تردد قدره 760 kc/s (أ) ما هو الطول الموجى للموجة التى ترسلها ؟ (ب) كم من الوقت تستغرق قمة الموجة المرسلة من المحطة لكى تصل الى القمر الذى يبعد مسافة قدرها $3.84 \times 10^8\text{ m}$
- ٧ - عندما يدق قلبك فان فروقا ضئيلة فى الجهد تتكون بين الأجزاء المختلفة من جسدك (وهذه تقاس بواسطة جهاز رسم القلب واختبارات طبية مماثلة) . افترض أن قلبك يدق خمسة وسبعين مرة فى الدقيقة (أ) ما هو تردد موجة ك م التى يرسلها جسدك نتيجة للجهد والشحنة المتذبذبة بشكل متتالى على جسدك ؟ (ب) ما هو الطول الموجى لموجة (ك م) الخافتة جدا التى يرسلها جسدك ؟
- ٨ - ان احدى الطرق التى يمكن بها امداد العضلات وأجزاء الجسم الأخرى بالحرارة هى العلاج بالانفاذ الحرارى وفيها يتم ارسال أمواج الرادار الى داخل الجسم مثلما يقوم موقد الأمواج الدقيقة بارسال أمواجه داخل المواد لتسخينها ، فيقوم المجال الكهربى المتذبذب للموجة بجعل الجزيئات ثنائية الاستقطاب والايونات تتحرك جيئة وذهابا مولدة بهذا حرارة من النوع الاحتكاكى ، كما أن المجال المغناطيسى المتذبذب يستحث ق.د.ك تسبب بدورها تسخين جول . وتبلغ قيمة الترددات العيارية فى هذه الطريقة 900 MHz (أ) ما هى الأطوال الموجية لاشعاع ك.م فى الهواء التى ينتج من تلك الترددات ، (ب) هل ترى أية مشكلة فى استخدام العلاج بالانفاذ الحرارى على وجه شخص تكون احدى أسنانه محشوة بمعدن ما ؟
- ٩ - وقع انفجار على بعد 50 km من شخص ما . ما هى الفترة التى تمر على الشخص ما بين رؤية الانفجار وسماع الصوت ؟ (اعتبر سرعة الصوت 340 m/s)
- ١٠ - يتجه سلك طوله 10 m فى اتجاه مجال كهربائى لموجة كهرومغناطيسية (أ) اذا كانت القيمة العظمى لفرق الجهد بين طرفى السلك 10^{-4}V فما هى القيمة العظمى للمجال الكهربائى لموجة ؟ (ب) ما هى القيمة العظمى للمجال المغناطيسى لنفس الموجة ؟ (ستكون هذه الإشارة ضعيفة الى حد ما) .
- ١١ - * تبلغ أبعاد هوائى اطارى على هيئة مستطيل $10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ وبه 200 لفة من السلك حوله . ما مقدار ق. د. ك المتولدة بين طرفى الاطار بسبب موجة كهرومغناطيسية ترددها 10^6 cps ويبلغ الحد الاقصى لمجالها الكهربائى 10^{-5} V/m
- ١٢ - * يقوم لوحان مستديران مساحة كل منهما A وأحدهما موضوع فوق الآخر بدور مكثف متوازى اللوحين . فاذا كانت المسافة بين اللوحين هى d ، فاثبت أن B بين اللوحين تعطى بالعلاقة $\mu_0 Ir/2A$ حين يمر تيار مقداره I فى المكثف ، المسافة r هى المسافة الشعاعية

(النصف قطرية) مقاسة من خط مراكز اللوحين الى النقطة المرادة .، تلميح : طبق قانون أمبير للدوائر على دائرة نصف قطرها r خلال النقطة التي يراد إيجاد قيمة B عندها . ثم استخدم التيار المكافئ خلالها .

١٣ - يدور الإلكترون السالب حول النواة الموجبة بتردد يبلغ $3.6 \times 10^{15} \text{ Hz}$ في صورة ذرة الهيدروجين لبوهر . لو أن هذا النظام يخضع للقوانين التي درست في هذا الفصل فإنه سيعمل كهوائي يشع أمواجاً لها هذا التردد . (أ) أوجد الطول الموجي لهذه الأمواج و (ب) اذكر في أى جزء من طيف ك . م . ستقع هذه الأمواج .

الفصل الثالث والعشرون

خواص الضوء

سنهتم أساساً في هذا الفصل والفصول القليلة التالية بجزء ضئيل جداً من الطيف الكهرمغناطيسي الكلي . يتكون هذا الجزء من مدى صغير من الأطوال الموجية التي تدركها العين وتعرف هذه الأطوال الموجية بالضوء . على أنه بالرغم من اهتمامنا الأساسي بالضوء إلا أننا سنتعلم الكثير مما يمكن تطبيقه على كل الأشعاع الكهرمغناطيسي .

٢٣ - ١ مفهوم الضوء

منذ قديم الازمنة كانت خواص الضوء ماثرا للدهشة والاثارة نحو اجراء تجارب . كما كانت طبيعة الضوء دائما موضوعا لتأملات عظيمة . ففي عصر نيوتن كان كل علماء تلك الفترة تقريبا يقومون بأبحاث علمية في طبيعة الضوء ، وبنى نيوتن نفسه كثيرا من شهرته من تجارب الضوء التي أجراها .

وعلى الرغم من عظيم اهتمامه بالضوء ، الا أن الطبيعة الداخلية للضوء ظلت محل جدل حتى مطلع القرن الحالى . وخلال عصر نيوتن ولسنوات خلت بعد ذلك كان هناك خلاف حول ما اذا كان شعاع الضوء هو تيار من الجسيمات أو هو أمواج من نوع معين . وقد كان نيوتن نفسه من أعظم مؤيدى النظرية الجسيمية ونظرا لمكانة فان الكثيرين كانوا يميلون لرأية . فى عام ١٦٧٠ استطاع كريستيان هيجنز وهو أحد معاصرى نيوتن أن يفسر كثيرا من خواص الضوء باعتباره موجيا فى طبيعته . وقد كان لكتا هاتين الفكرتين حول طبيعة الضوء مؤيديها .

ولقد ظل الأمر كذلك حتى عام ١٨٠٣ حين قدم توماس يونج (وبعدها بقليل أوجستين فرنل) برهاننا يوضح ان الأشعة الضوئية تستطيع التداخل مع بعضها البعض مثل الأمواج الصوتية وبهذا أصبحت النظرية الموجية مقبولة عالميا . وفى ذلك الوقت تقريبا أمكن قياس سرعة الضوء فى الماء وقد كانت هذه النتيجة مناقضة للنظرية الجسيمية ومعضدة للنظرية الموجية . ومن ثم بحلول عام ١٨٦٥ حين أثبت ماكسويل نظريا أن الأمواج الكهر مغناطيسية يجب أن تنتقل بسرعة الضوء ، أمكن بارتياح كبير تقبل فكرة أن للضوء أمواجا .

قد يظن الآن أنه بقدوم عام ١٩٠٠ أصبحت طبيعة الضوء مفهومة بشكل كبير ولكن حتى ذلك الوقت لم يكن متاحا الكثير عن انبعاث الضوء من الذرات . وظل الأمر كذلك حتى عام ١٩١٣ حين أعطى بوهر أول تفسير منطقى صحيح لميكانيكية انبعاث الضوء ، وقد عدلت مفاهيم بوهر كثيرا حتى أن أبتعاث الضوء لم يفهم بشكل نهائى الا حوالى عام ١٩٣٠ . علاوة على ذلك ، أشار أينشتين عام ١٩٠٥ أنه توجد خاصية واحدة على الأقل للضوء وهى التأثير الكهروضوئى - التى ستناقشها فى الفصل السادس والعشرين - قد أحسن تفسيرها باعتبار الضوء مكونا من جسيمات أو كمات . وقد تم التوسع فى هذا المفهوم خلال السنوات التالية حتى أصبحنا اليوم نعتبر الضوء ذا شخصية مزدوجة فهو جزئيا يبدو كأمواج وجزئيا كجسيمات . وستتطرق بالمزيد من الحديث عن هذه الأشياء وتطورات أخرى فى الفصول التالية .

من الواضح أن موضوع الضوء ذو تاريخ علمى متنوع وطويل ونتوقع أنه فى السنين القادمة سيستمر فهمنا للضوء وطبيعته فى النمو والاطراد . وسيكفينا مع هذا

خلال الفصول القليلة القادمة أن نركز على مظاهر الضوء التي تتضح من طبيعته الكهرمغناطيسية . أما المميزات الأخرى للضوء والتي تتضمن طبيعته الجسيمية وأصله الذري فانها ستناقش في الأقسام المتأخرة من هذا الكتاب .

تقاس الأطوال الموجية لأموال الضوء المرئية بطرق ستناقش في الفصل الخامس والعشرين . وقد وجد أن هذه الأطوال الموجية تقع في المدى $4 \times 10^{-5} \text{ cm}$ إلى $7 \times 10^{-5} \text{ cm}$ ويوضح الشكل ٢٣ - ١ موقع الألوان المختلفة على تدرج الأطوال الموجية وكذلك على لوحة الألوان الملحقه .

لاحظ أيضا أن هناك ثلاث وحدات لقياس الطول قد استخدمت في شكل الاطوال الموجية للضوء ٢٣ - ١ .

	بنفسجى	أزرق	أخضر	أصفر	أحمر
سينتمترات	4×10^{-5}	5×10^{-5}	6×10^{-5}	7×10^{-5}	
انجستروم	4000	5000	6000	7000	
نانومتر	400	500	600	700	

تقاس الأطوال الموجية بشكل عام بالوحدات التالية :

$$1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m} \quad \text{انجستروم}$$

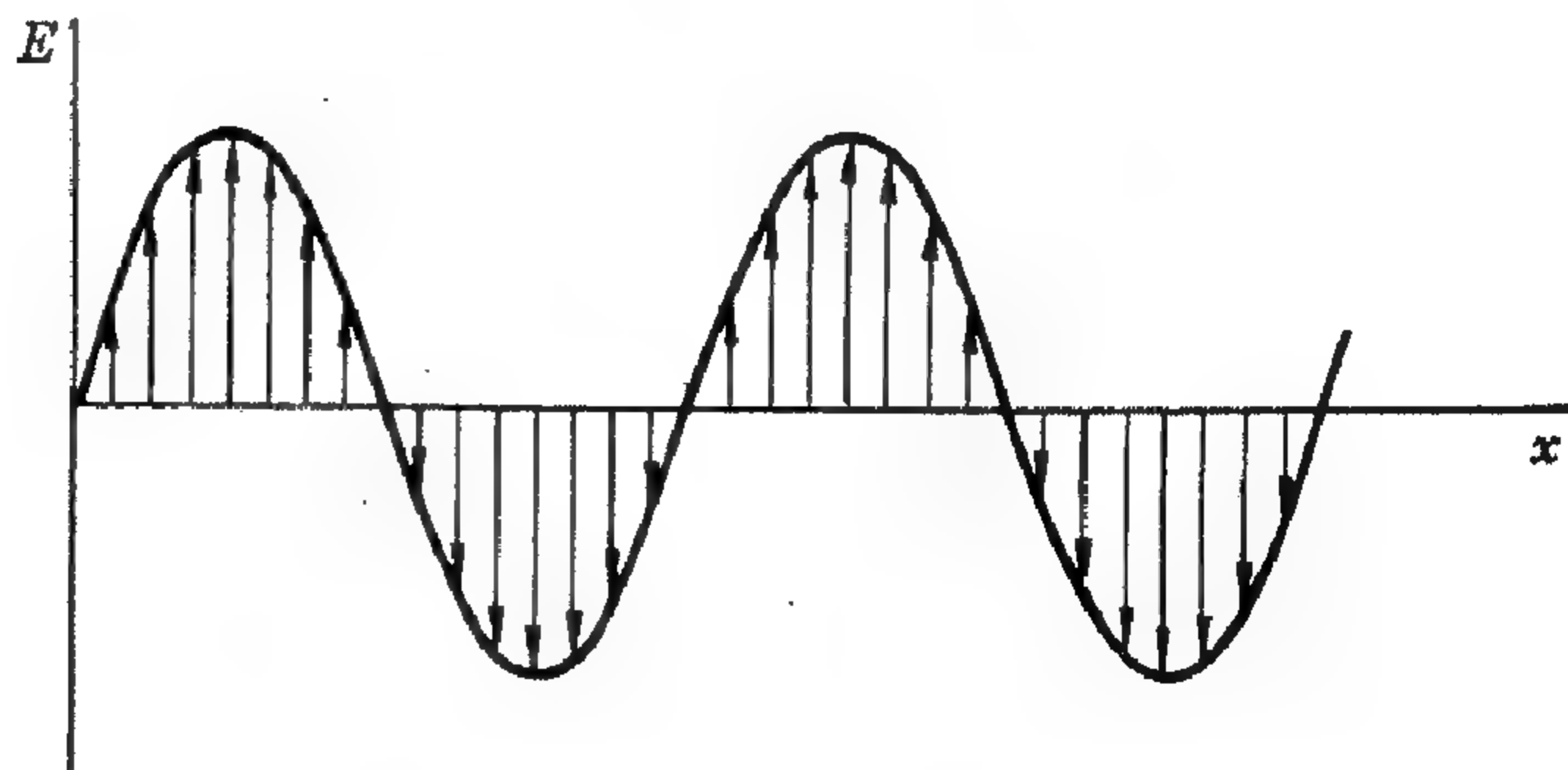
$$1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm} = 10^{-6} \text{ m} \quad \text{ميكرومتر}$$

$$1 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ cm} = 10^{-9} \text{ m} \quad \text{نانومتر}$$

شكل ٢٣ - ١

يعتبر التناظر بين الأطوال الموجية واللون الموضح هنا تقريبا فقط فالألوان مثل الأخضر المزرق والبرتقالى تحتل المناطق المتوسطة (انظر اللوحة الملونة)

الأمواج الضوئية ذات طبيعة كهرمغناطيسية وتتكون من مجال متعامد ومتطاور مع مجال مغناطيسى ، كما نوقش في الفصل السابق . ويوضح الشكل ٢٣ - ٢ المجال الكهربى لموجة تنتشر فى اتجاه واحد فى الفراغ ومن المفروض أن الموجة تنتفل على طول محور x الى اليمين . لاحظ أن المجال الكهربى المتذبذب متعامد مع محور x وعلى ذلك تكون أمواج الضوء مستعرضة ، وذلك لأن حركة التذبذب



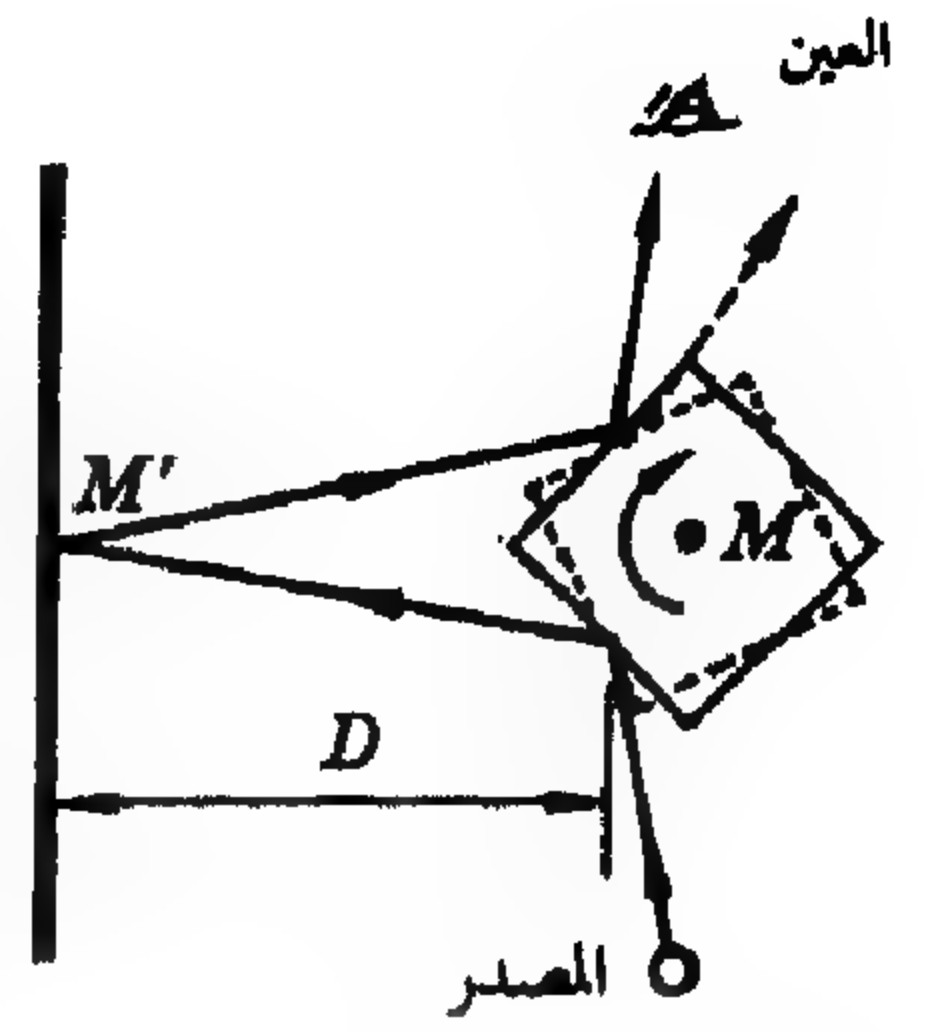
شكل ٢٣ - ٢

يتذبذب المجال الكهربى لموجة كهرمغناطيسية عموديا على اتجاه الانتشار وعليه تكون الموجة مستعرضة .

عمودية على اتجاه الانتشار وكونها كذلك يجعلها تشترك في كثير من الخواص مع أمواج الأوتار المشدودة المتذبذبة وكذلك على أمواج سطح الماء إذ أن هذه أيضا أمواج مستعرضة .

٢٣ - ٢ سرعة الضوء

هناك عدة طرق لتعيين سرعة الضوء وسنذكر هنا إحدى هذه الطرق العامة وهي الطريقة التي استعملت على نطاق واسع في الأعمال ذات الدقة العالية . وقد استخدم هذه الطريقة مايكلسون في بداية الثلاثينات من هذا القرن لقياس سرعة الضوء بين قمتي جبلين في كاليفورنيا . وقد استخدمت نفس الطريقة العامة من قبل ولكن لمسافات أصغر لقياس سرعة الضوء داخل المواد بدلا من الهواء .



شكل ٢٣ - ٣

إذا دارت المرآة بالسرعة الصحيحة بالضبط فإن الشعاع ينعكس إلى عين المشاهد . تكون المسافة D في الواقع أكبر بكثير جدا عما هو مبين

يستخدم في هذه الطريقة الجهاز الموضح بصورة مبسطة في الشكل ٢٣ - ٣ . ينعكس شعاع ضوئي من المصدر من أحد جوانب المكعب M الذي يعتبر أربعة جوانب منه مرايا ، ثم ينعكس الشعاع من المرآة M' عائدا إلى المكعب ، حيث ينعكس مرة أخرى كما هو مبين . فإذا كان المكعب في المكان الصحيح بالضبط فإن الشعاع سيدخل عين المشاهد في الوضع الموضح . (في الحقيقة ينظر المشاهد خلال تلسكوب موضوع عند مكان العين في الرسم ، فيرى صورة للمصدر) .

جدول ٢٣ - ١

معاملات الانكسار

المادة	$c/v = n$	المادة	$c/v = n$
الهواء*	1.0003	زجاج تاجي	1.52
الماء	1.33	كلوريد الصوديوم	1.53
إيثانول	1.36	بوليسترين	1.59
أستون	1.36	ثالي كبريتيد الكربون	1.63
كوارتز منصهر	1.46	زجاج ظرفي	1.66
بنزين	1.50	ايوديد الليثيوم	1.74
لوسيت اوبليكسيجلاس	1.51	ماس	2.42

* عند الضغط ودرجة الحرارة المعيارين

افترض ، مع هذا أن المكعب يدور حول محور يخترق مركزه عموديا على الصفحة حين يكون في الوضع المبين بالخطوط السميكة في شكل ٢٣ - ٣ فإن الشعاع ينعكس إلى المرآة M' كما هو مبين . ومع الوقت يعود الشعاع إلى المكعب من المرآة M' ويكون المكعب قد أخذ الوضع المبين بالخط المتقطع وبهذا لا ينعكس الشعاع نحو عين المشاهد . يجب أن يدور المكعب ربع دورة خلال الوقت اللازم للشعاع كي ينتقل إلى M' ثم يعود حتى يمكن أن ينعكس بالطريقة الصحيحة ، وعندئذ فقط سيعكس المكعب الشعاع نحو عين المشاهد .

وتتلخص تقنية التجربة في الاسراع بحركة المكعب حتى ينعكس الشعاع بالطريقة المطلوبة . وعند تلك السرعة فائنا نعلم أن الزمن اللازم لربع دورة من دورات المكعب يساوى الزمن الذى يستغرقه الضوء فى قطع مسافة مقدارها $2D$ وكل ما نحتاج معرفته هو سرعة* دوران المكعب وكذا المسافة D لكي نحسب سرعة الضوء . وقيمة سرعة الضوء المتخذة حاليا فى الفراغ هي

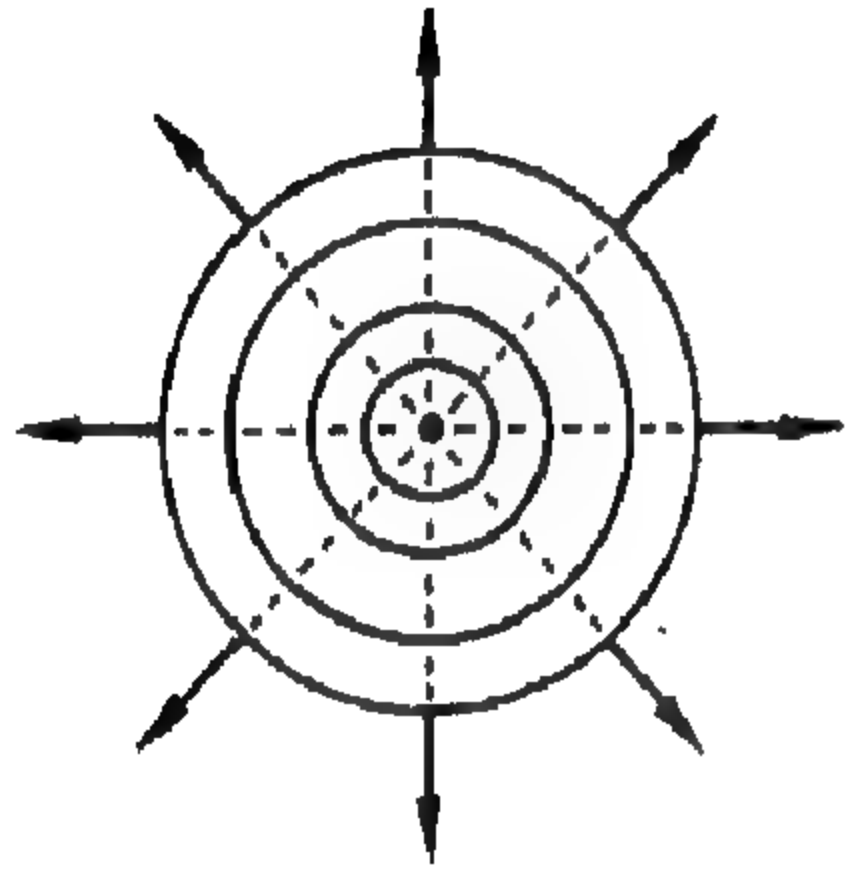
سرعة الضوء

$$c = 2.997925 \times 10^8 \pm 0.000010 \times 10^8 \text{ m/s}$$

وتبلغ سرعة الضوء فى الهواء مقدارا يقل بنحو 0.03 فى المائة فقط عن هذه القيمة .

ينتقل الضوء أسرع فى الفراغ ، وتكون سرعته فى المواد الأخرى أقل دائما من c . علاوة على ذلك فان السرعة خلال المواد تعتمد على الطول الموجى للضوء . وكذلك على تركيب تلك المواد وقد وضعنا قائمة بالنسبة بين سرعة الضوء فى الفراغ الى سرعته فى المواد المختلفة فى الجدول ٢٣ - ١ وكان الطول الموجى المستخدم لهذا الجدول هو $\lambda = 5890 \text{ \AA}$ وهو الطول الموجى للضوء الأصفر الذى يبعث به مصباح بخار الصوديوم .

٢٣ - ٣ انعكاس الضوء

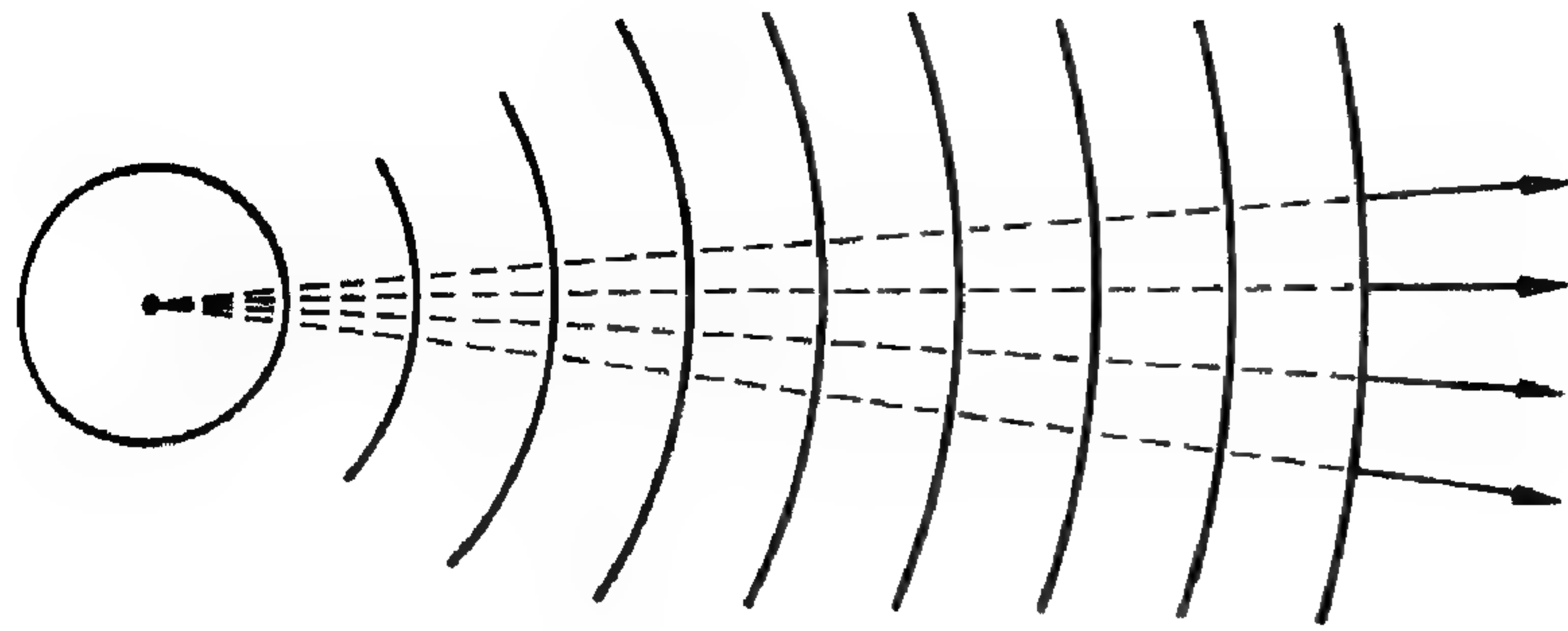


شكل ٢٣ - ٤

تكون الأشعة متعامدة مع
صدر الموجة وتشير الى اتجاه
حركة الموجة

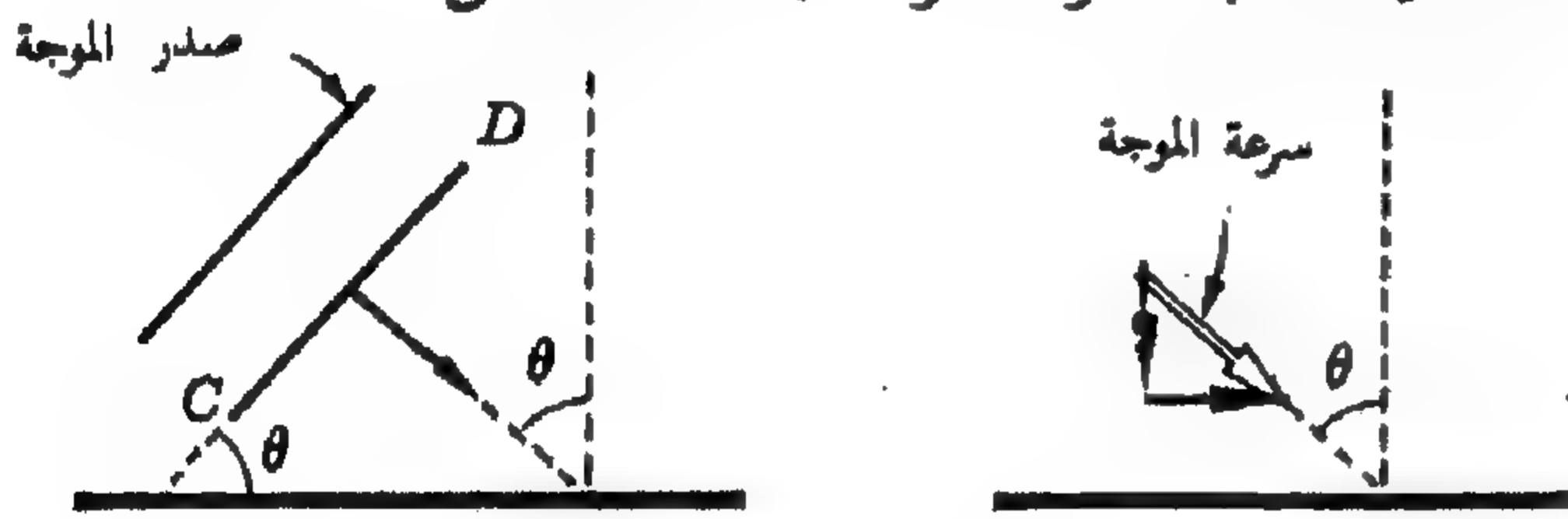
حين يلقي حجر فى بركة كبيرة ساكنة من الماء فان مجموعة من الأمواج المستديرة تنتقل خارجة من النقطة التى اصطدم الحجر فيها بالماء . وكلنا على علم بهذا الموقف ولكن دعنا نتمعن فيه بشئ من التفصيل . يوضح الشكل ٢٣ - ٤ هذه الأمواج الدائرية أو صدور الموجة ، وهى تنتقل الى الخارج من المركز فى الاتجاهات المبينة بالأسهم وتسمى هذه السهام المنطلقة فى اتجاه صدر الموجة أشعة . لاحظ أن الأشعة تكون دائما متعامدة مع صدور الموجة . ومن ثم يمكننا تحديد حركة الموجة اما باستعمال الأشعة أو برسم الموجة نفسها ولكل طريقة قيمتها .

إذا اعتبرنا الحالة التى نكون فيها على مسافة كبيرة من مصدر الموجة فان صدور الموجة تصبح تقريبا خطوطا مستقيمة (أو مستويات مسطحة اذا كنا نتناول الأبعاد الثلاثة) . كما هو مبين فى شكل ٢٣ - ٥ . يستدل من هذا الشكل أنه على مسافات بعيدة عن المصدر تكون الأمواج عبارة عن أمواج مستوية وتكون الأشعة متوازية . من المناسب دائما استعمال الأمواج المستوية فى الحسابات وحين يكون المصدر بعيدا بدرجة كافية أو حين تستعمل عدسة مناسبة فان الأمواج تكون غالبا من هذا النوع .

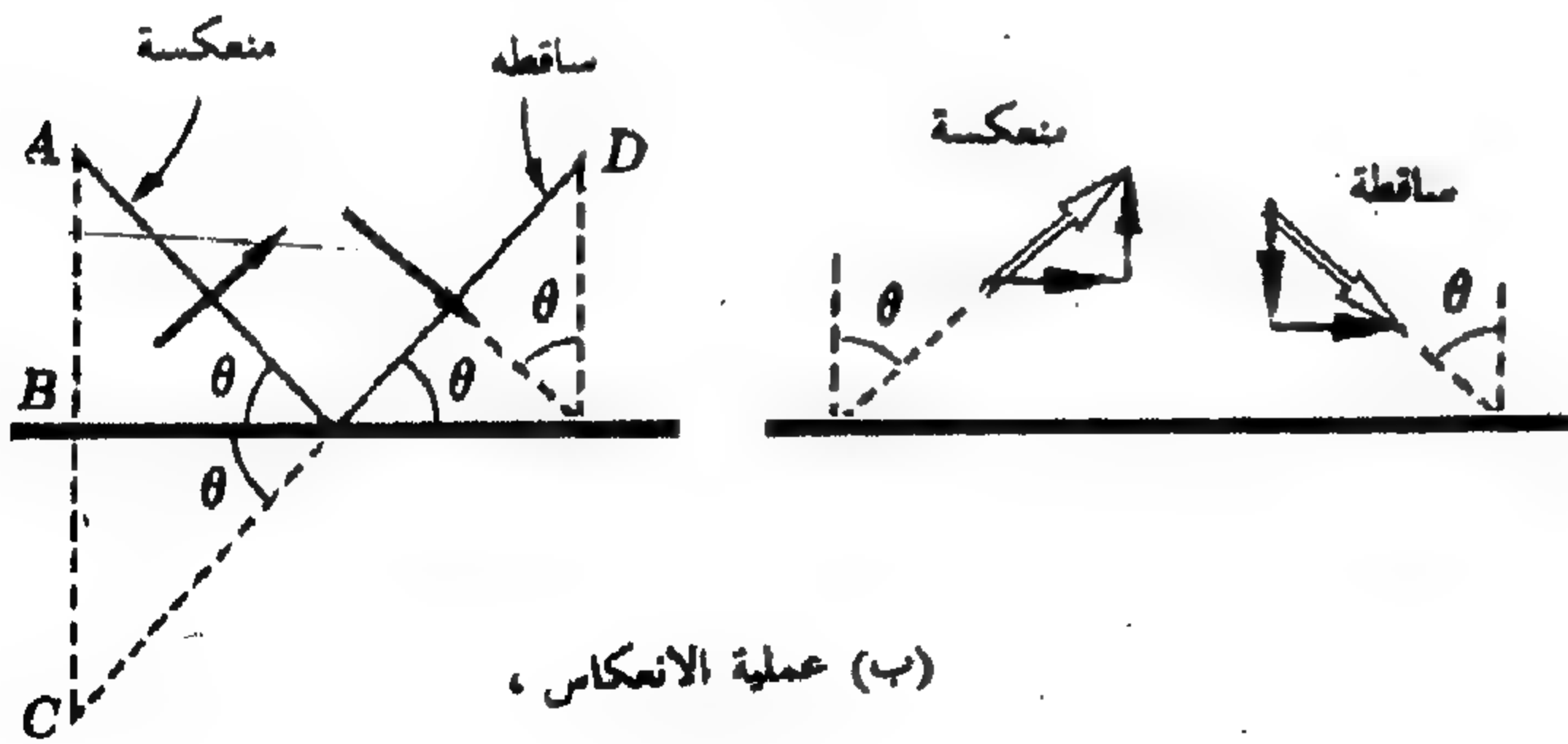


شكل ٢٣ - ٥
عندما تنتشر الموجة الكرية
بعيدا عن المصدر فانها تصبح
أكثر شبيها بموجة مستوية
وتصبح الاشعة أقرب ما
تكون متوازية

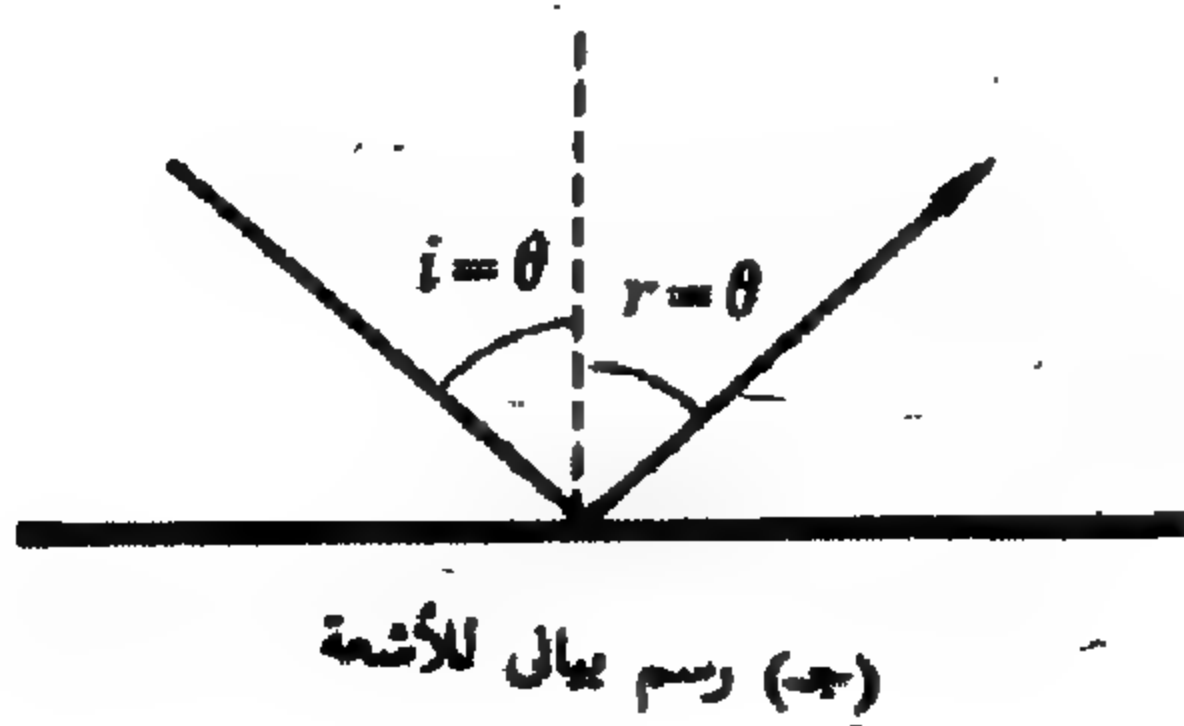
افترض أن سلسلة من أمواج الماء المستوية تسقط على حائط مسطح كما هو مبين في الشكل ٢٣ - ٦ أ . يمكن تصور سرعة الأمواج على أنها مكونة من مركبتين : احدهما عمودية على الحائط والأخرى موازية للحائط . تنعكس المركبة العمودية عند اصطدامها بالحائط وهذا تنعكس الموجة الى أعلى كما يبين الشكل ٢٣ - ٦ ب . ولو أن صدر الموجة الساقطة CD كان قد استمر في اتجاهه الأصلي لكان قد وصل الى الوضع CD في الشكل ٢٣ - ٦ ب ، ولكنه بدلا من هذا ينعكس الى أعلى وتصبح النقطة الأصلية C على صدر الموجة هي في الواقع عند النقطة A فوق السطح بحيث $\overline{AB} = \overline{BC}$ لاحظ ايضا اتجاه حركة الموجة بعد الانعكاس .



موجة ساقطة



(ب) عملية الانعكاس ،



(ج) رسم بيان للأشعة

شكل ٢٣ - ٦
تنعكس الموجة الساقطة بحيث
تساوى زاوية السقوط / زاوية
الانعكاس

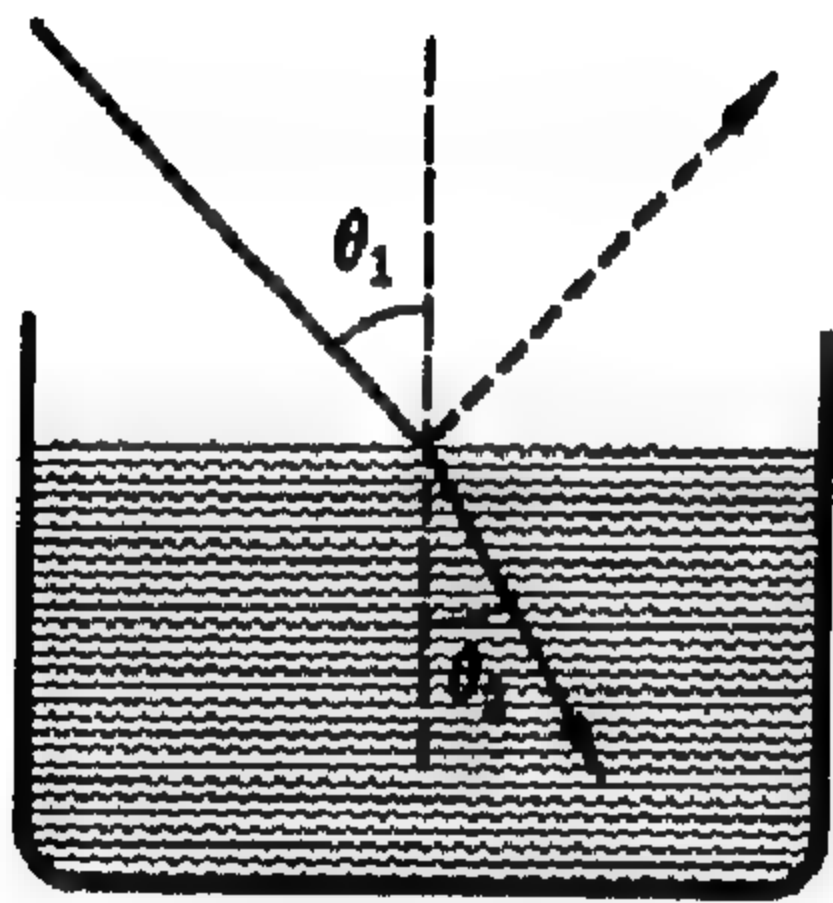
تفيدنا الحقيقة القائلة بأن $\overline{AB} = \overline{BC}$ في الشكل ٢٣ - ٢١ على الفور بأن الزوايا الأربعة كلها المشار إليها بالرمز θ في الشكل متساوية . (لماذا ؟) . علاوة على ذلك ، حيث أن الأشعة متعامدة مع صدور الموجة فإن الزاوية التي يصنعها الشعاع مع العمود القائم على السطح تكون هي أيضا θ كما هو يوضح ذلك الجزء (ج) من الشكل . (لماذا ؟) . ويقودنا هذا الى استنتاج أن زاوية السقوط i تساوى زاوية الانعكاس r .

تعتبر حقيقة أن موجة الماء تنعكس بحيث تكون زاوية السقوط مساوية لزاوية الانعكاس صحيحة على وجه العموم . فقد كنا نستطيع استعمال نفس طريقة التحليل لبيان أن أمواج الضوء يمكن أن تنعكس بنفس الطريقة . لاحظ أن الفرض الاساسي الوحيد الذي وضع هو أن مركبة السرعة العمودية على السطح قد انقلبت عند الانعكاس وأن المركبة الأخرى لم تتغير . ستكون النتيجة التي أوجدناها صالحة لأي نوع من الأمواج ينطبق عليه هذا الفرض . وقد أثبتت القياسات التي أجريت على الضوء والصور الأخرى للاشعاع الكهرومغناطيسي هذا الاستنتاج . يمكننا إذن صياغة القاعدة التالية :

قانون الانعكاس

زاوية السقوط تساوى زاوية الانعكاس

٢٣ - ٤ انكسار الضوء : قانون سنل



شكل ٢٣ - ٧

عندما يمر شعاع من الضوء من مادة أقل كثافة ضوئية الى مادة أكثر كثافة ضوئية (من الهواء الى الماء مثلا) . فإن الشعاع ينكسر نحو العمود المقام على السطح .

حين ينتقل شعاع ضوئي من الهواء الى الماء فإن مساره ينحني كما هو مبين في الشكل ٢٣ - ٧ ويسمى هذا التغير في اتجاه شعاع ما حين يمر من مادة الى أخرى الانكسار . الزاوية θ_1 هي بالطبع زاوية السقوط وتسمى الزاوية θ_2 زاوية الانكسار . هناك بعض الأشعة التي تصطدم مع سطح الماء ، التي تنعكس كما هو مبين بالشعاع المتقطع في الشكل ٢٣ - ٧ ولكننا سنتجاهل هذا الآن .

من المناسب أن نعتبر حركة صدور الموجة في موجة مستوية لكي نجد علاقة بين θ_1 و θ_2 وذلك باستعمال الشكل ٢٢ - ٨ الذي يصور الموقف . سنعتبر أن الضوء يتحرك بسرعة v_1 في المادة العليا وبسرعة v_2 في المادة السفلى ، بحيث كانت v_1 أكبر من v_2 (إذا كان المادة العليا هواء فإن $v_1 = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) لابد أنك تستطيع اثبات أن الزوايا θ_1 و θ_2 هي نفسها المبينة في جزئي الشكل . سنعتبر أيضا أن صور الموجة ABC قد انتقل الى الوضع $A'B'C'$ بعد زمن قدره t ومن ثم يكون لدينا في الشكل ٢٣ - ٨ ب

$$l = v_2 t \quad , \quad d = v_1 t$$

التي تؤول بعد قسمة احدى المعادلتين على الاخرى

$$\frac{d}{l} = \frac{v_1}{v_2}$$

علاوة على ذلك ، من الشكل ٢٣ - ٨ ب نرى أن

$$\frac{l}{BB'} = \sin \theta_2 \quad \frac{d}{BB'} = \sin \theta_1$$

التي تصبح بعد قسمة احدهما على الأخرى ،

$$\frac{d}{l} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

ولكن بما أن $d/l = v_1/v_2$ تصبح العلاقة ،

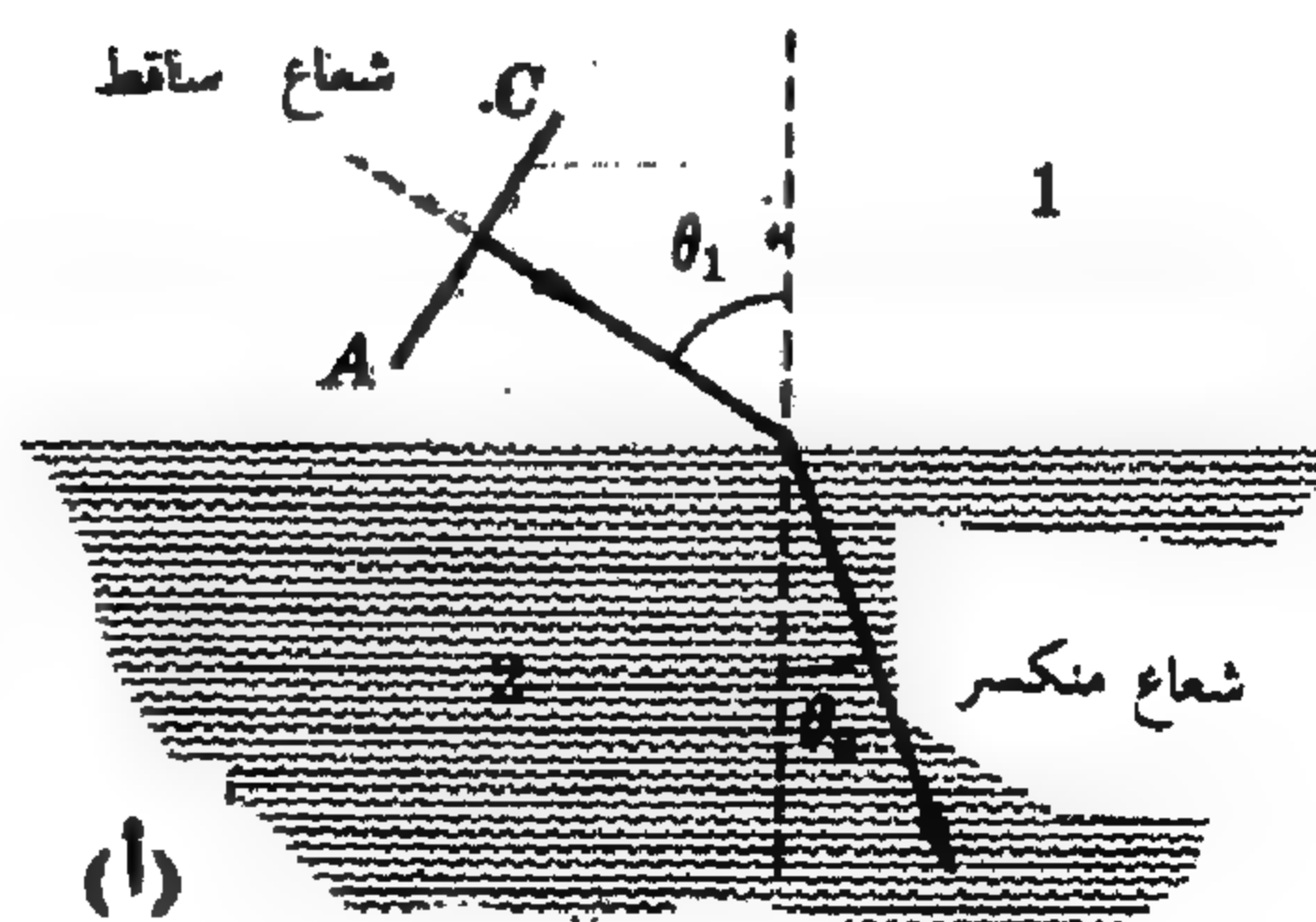
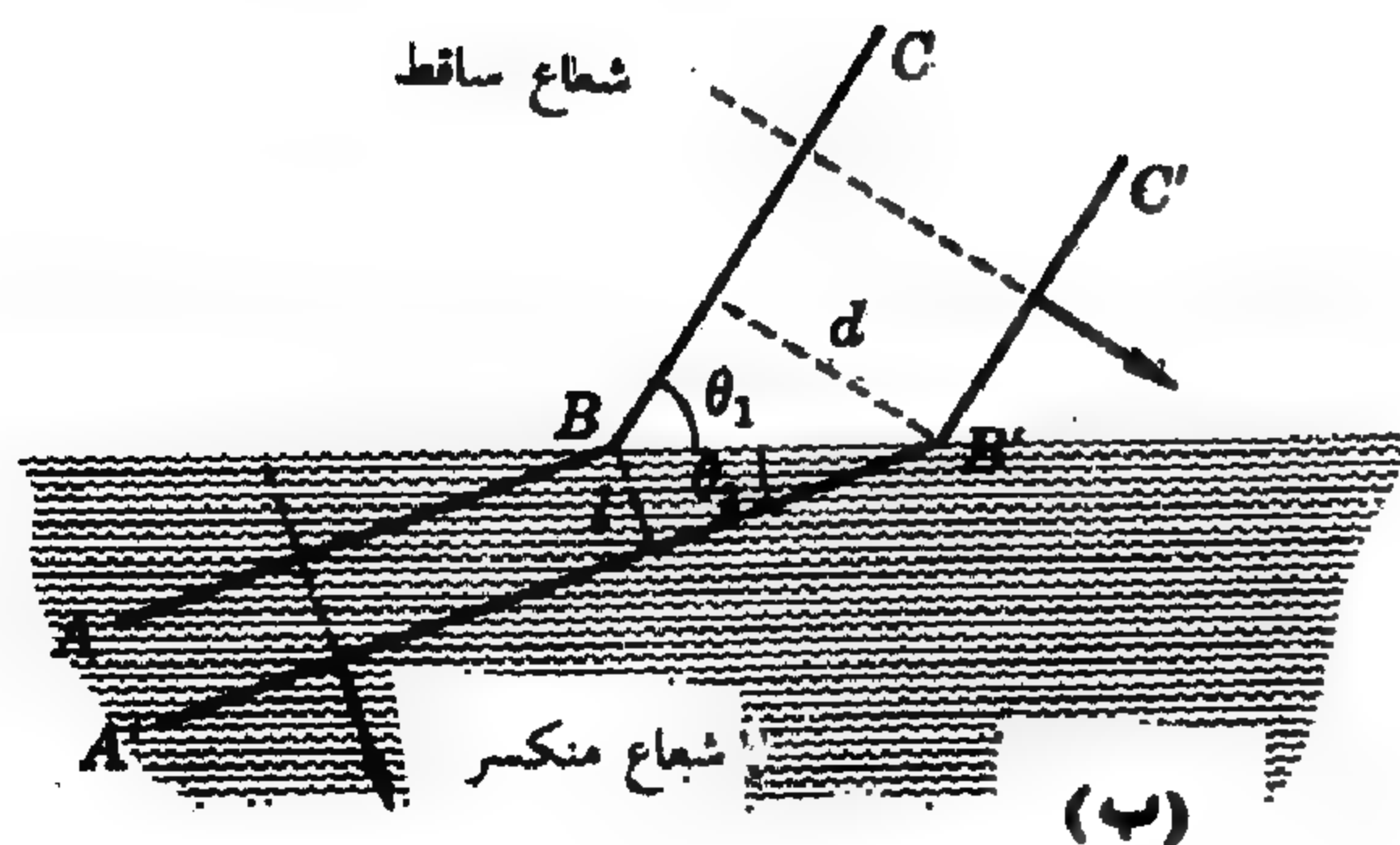
$$(١ - ٢٣) \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

هذه العلاقة هي احدى صور قانون سنل . وفي أعم صورة يكتب هذا القانون لحالة تكون فيها المادة ١ فراغا . وفي تلك الحالة $v_1 = c$

$$(٢ - ٢٣) \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c}{v_2} = n$$

شكل ٢٣ - ٨

حيث أن الموجة تنتقل بشكل أبطأ في المادة السفلى عنها في المادة العليا فإن θ_2 تكون أصغر من θ_1



تعريف

تسمى الكمية n معامل الانكسار المطلق للمادة 2 (أو بشكل أكثر عمومية معامل انكسار المادة 2) . يعتبر معامل الانكسار المطلق للمادة على أنه النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ وسرعة الضوء في المادة . وقد سبق وأن وضعنا قائمة بقيم هذه الكمية لمواد مختلفة في الجدول ٢٣ - ١ لاحظ أن معامل الانكسار المطلق يكون دائما أكبر من الوحدة أو يساويها ومن الطبيعي أن معامل انكسار الفراغ يجب أن يكون c/c أو الوحدة .

وكثيرا ما تسمى النسبة v_1/v_2 في المعادلة (٢٣ - ١) معامل الانكسار النسبي وتبرز هذه المصطلحات لأن $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ بحيث أن $v_1/v_2 = n_2/n_1$ ومن ثم يمكن كتابة المعادلة (٢٣ - ١) على الصورة ..

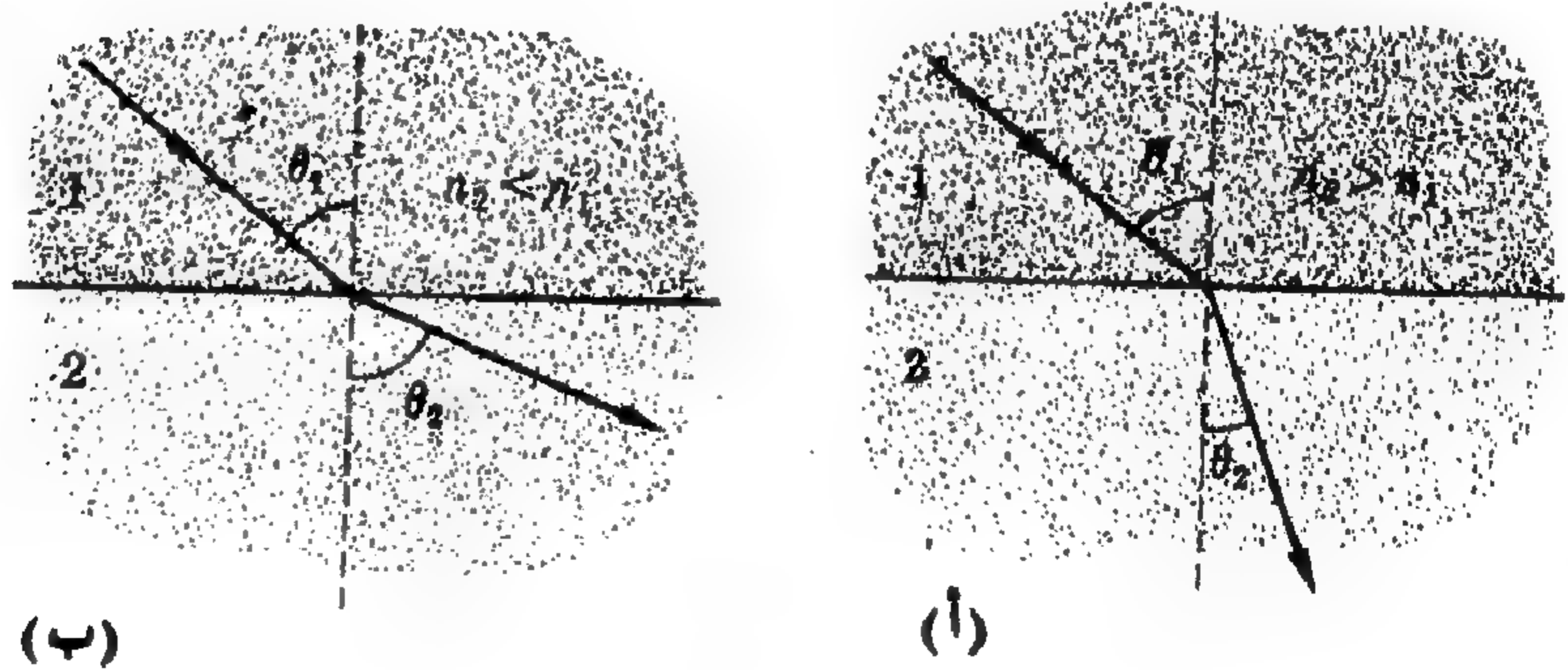
قانون سنل

٢٣ - ٣

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

والتي سنشير إليها كقانون سنل . فإذا كانت المادة 1 هواء تختصر هذه المعادلة الى المعادلة (٢٣ - ٢) ، وذلك لأن $n_1 = 1$

ومن هنا نرى أنه إذا كانت n_2 أكبر من n_1 فإن $\sin \theta_1$ يكون أكبر من $\sin \theta_2$ وفي هذه الحالة تكون θ_1 أكبر من θ_2 وهذا ما يصفه الشكل ٢٣ - ٩ أ وهو أكثر المواقف شيوعا . على أننا نعني أحيانا بالحالة العكسية ، أي حين يكون n_2 أصغر من n_1 وهذا ما ينطبق على شعاع من الضوء ينتقل من الزجاج الى الهواء مثلا ، وعندئذ تتنبأ المعادلة (٢٣ - ٣) بأن θ_2 أكبر من θ_1 كما هو موضح في الشكل ٢٣ - ٩ ب



شكل ٢٣ - ٩

إذا كان $n_2 > n_1$ فإن الشعاع ينحني نحو العمود بينما يحدث العكس إذا كان $n_2 < n_1$

مثال توضيحي ٢٣ - ١ يقوم غواص تحت سطح المحيط بتوجيه نور كشاف الى أعلى بزاوية تبلغ 37° مع الرأسى . ما هي الزاوية التي يخرج بها الضوء الى الهواء ؟ طريقة الحل : يوضح الشكل ٢٣ - ١٠ هذا الموقف . لاحظ أن المادة 1 هي الماء والمادة 2 هي الهواء بتطبيق قانون سنل ووضع $n_1 = 1.33$ و $n_2 = 1.00$ نجد أن

$$1.33 \sin 37^\circ = 1.00 \sin \theta$$

$$\theta = 53^\circ \quad \text{أو} \quad \sin \theta = 0.80$$

مثال توضيحي ٢٣ - ٢ يسقط ضوء على سطح الماء في طبق زجاجي له قاع مستو ومسطح كما هو مبين في الشكل ٢٣ - ١١ .. ما هي الزاوية التي يخرج بها الضوء من قاع الطبق ؟

طريقة الحل : عند السطح هواء - ماء يكون لدينا

$$1.00 \sin \theta_1 = n_w \sin \theta_2$$

أما عند السطح المين ماء - زجاج فان لدينا

$$n_w \sin \theta_2 = n_g \sin \theta_3$$

وحيث أن الكميات التي تساوى مقدارا مشتركا تكون فيما بينها متساوية فان :

$$1.00 \sin \theta_1 = n_g \sin \theta_3$$

لاحظ أن هذه المعادلة هي بالضبط العلاقة التي كان من الممكن الحصول عليها اذا لم يكن الماء موجودا واذا مر الضوء مباشرة الى الزجاج من الهواء . عند التقدم نحو السطح الأسفل زجاج - هواء يكون لدينا :

$$n_g \sin \theta_3 = 1.00 \sin \theta_4$$

بدمج هذه المعادلة مع المعادلة السابقة نجد أن

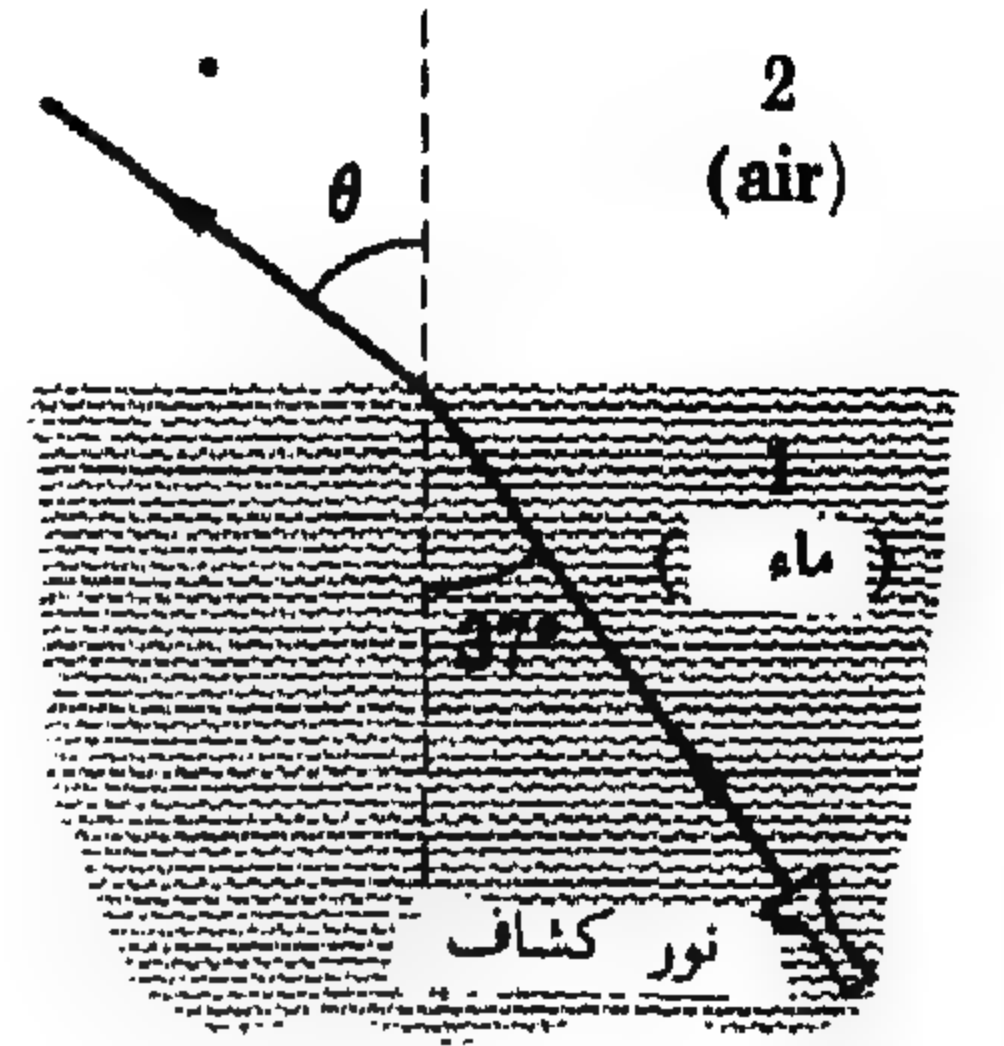
$$\sin \theta_1 = \sin \theta_4$$

$$\theta_1 = \theta_4$$

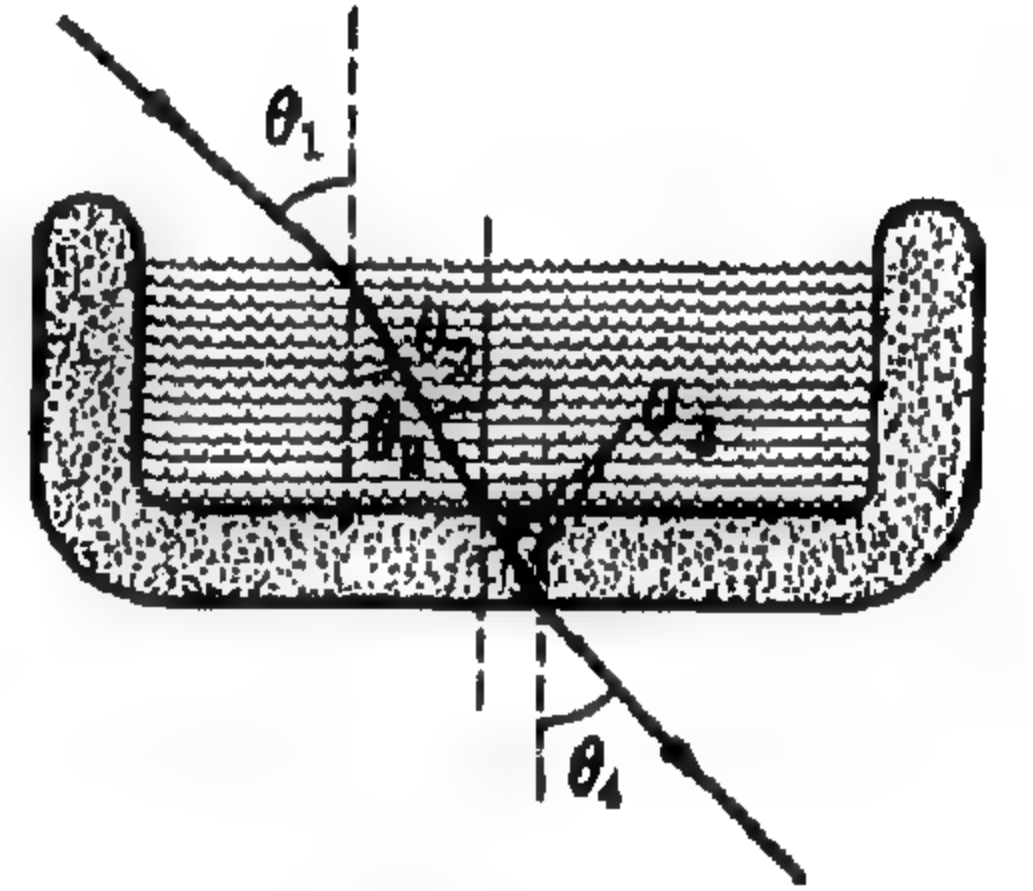
توضح هذه النتيجة الهامة أن الطبقة المتجانسة لمادة شفافة لا تغير اتجاه الشعاع الضوئي . على أن الشعاع تحدث له إزاحة جانبية عادة (لماذا ؟)

٢٣ - ٥ الانعكاس الكلي الداخلي

يدين الماس - بعيدا عن قيمة الرومانسية - يقدر كبير من جماله لظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي ، فهذه الخاصية هي التي تجعل الماسات تتلأأ في جميع



شكل ٢٣ - ١٠ يرسل الكشاف شعاعا من تحت الماء بحيث ينحني هذا الشعاع بعيدا عن العمود عندما يمر الهواء



شكل ٢٣ - ١١ لا يتغير اتجاه حركة الشعاع الضوئي عند وضع لوح متواز من مادة شفافة . ملاحظة : $\theta_2 > \theta_3$

الاتجاهات . وكل ما هنالك أن شعاعا ضوئيا يصبح محبوسا داخل الماسة ، وحين يخرج في النهاية فان خروجه يكون في أى من الاتجاهات العديدة . ومن ثم تصدر البلورة ضوء (أو تتلألأ) في اتجاهات عشوائية . هناك العديد من الحالات الأخرى التى يكون فيها الانعكاس الكلى الداخلى ذو أهمية . سنقوم الآن بدراسة هذا النوع من سلوك الضوء بشئ من التفصيل .

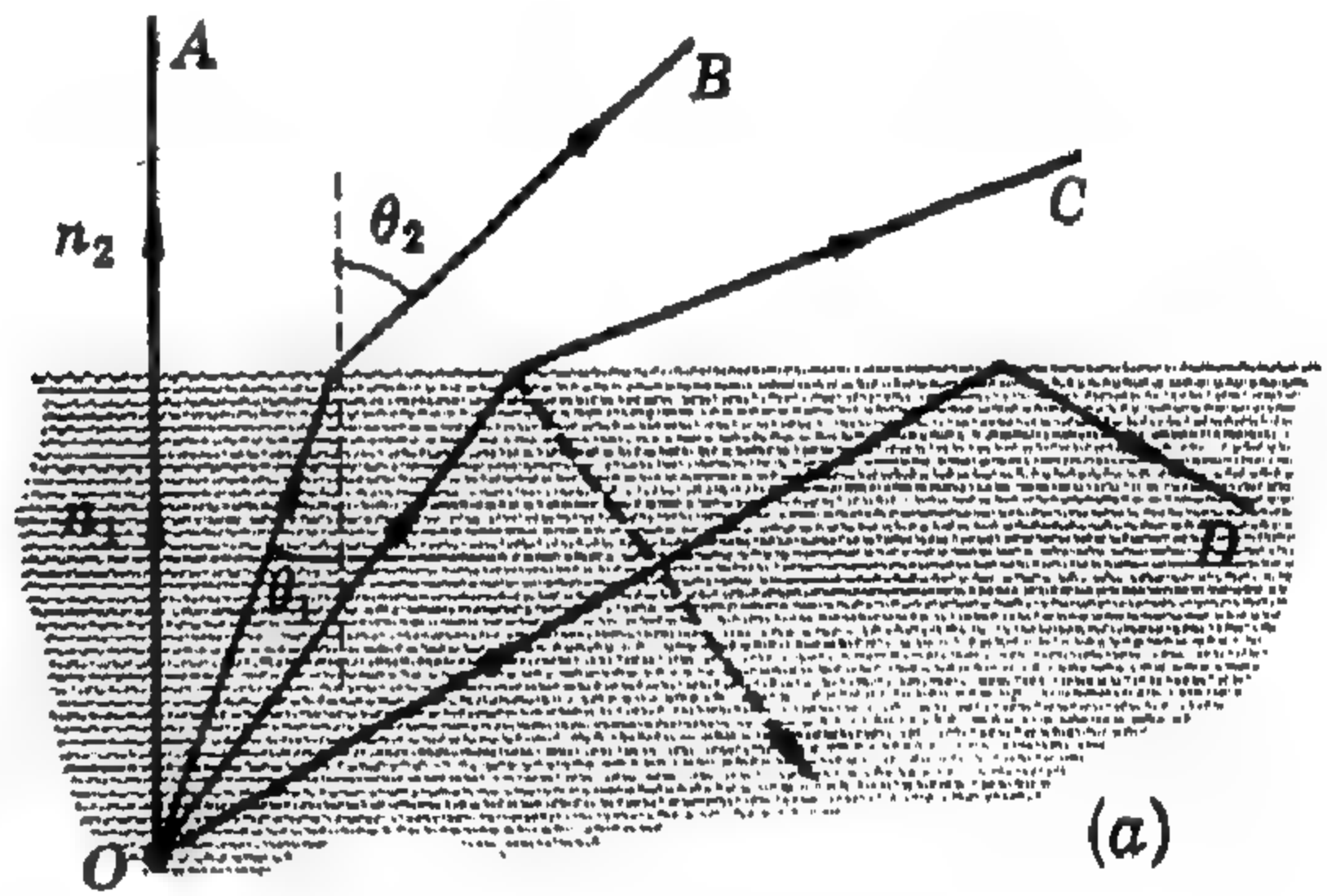
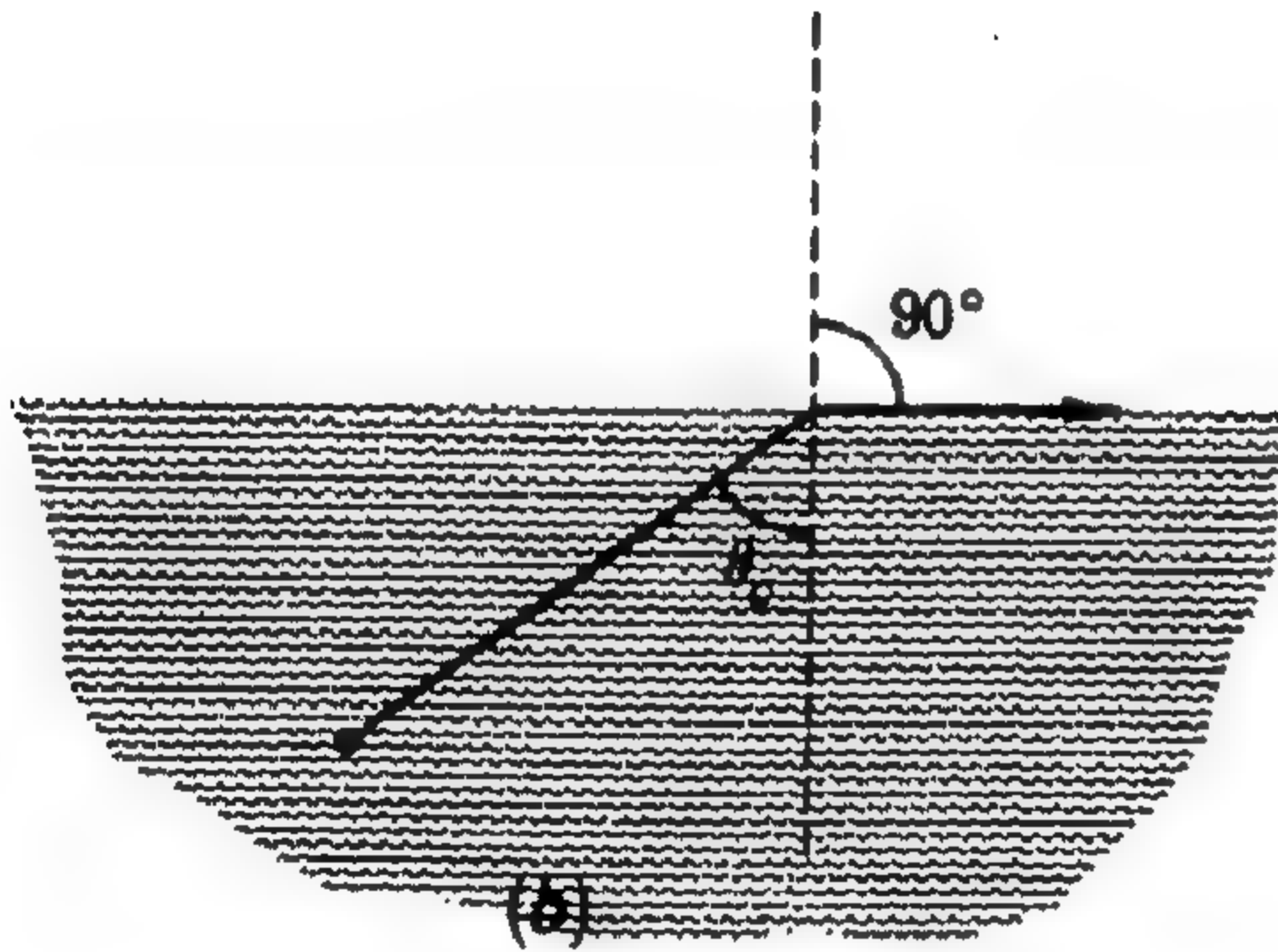
اعتبر مصدر للضوء O تحت سطح بحيرة كما يبين ذلك الشكل ٢٣ - ١٢ . أ يفيد قانون سنل بأن

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

وحيث أننا نعتبر n_1 أكبر من n_2 فإن θ_2 تكون أكبر من θ_1 كما هو مبين لاحظ ان الشعاع OC قد انحنى موازيا تقريبا لسطح الماء عند خروجه . من الواضح أن الحالة الحرجة المبينة في الشكل ٢٣ - ١٢ تحدث عندما $\theta_2 = 90^\circ$ يمر الشعاع الخارج بمجرد مرور سطحي وعلى هذا فعندما $\theta_2 = 90^\circ$

شكل ٢٣ - ١٢
عندما تكون θ_1 أكبر من
زاوية حرجة θ_c فإن
الشعاع ينعكس كليا داخليا

$$\sin 90^\circ = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_c$$



(٢٣ - ٤)

$$1.00 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_c$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

أو
ومنها

إذا كانت θ_1 أكبر من θ_c ، الزاوية الحرجة ، فإن قانون سنل يفيد بأن $\sin \theta_2$ أكبر من 1.00 ولكن $\sin 90^\circ$ يساوى 1.00 وهى أكبر قيمة يمكن أن تكون لجيب الزاوية أى أن قانون سنل يفيد أنه من المستحيل أن يوجد شعاع منكسر إذا كانت θ_1

أكبر من θ_c ومن السهل فهم هذا بالرجوع الى الشكل ٢٣ - ١٢ ب .. عندما تكون $\theta_1 = \theta_c$ فان الشعاع المنكسر يخرج بالكاد من سطح الماء أما اذا كانت θ_1 أكبر من θ_c فان الشعاع لن يخرج من الماء بل سينعكس كما هو مبين بالشعاع OD في الشكل .

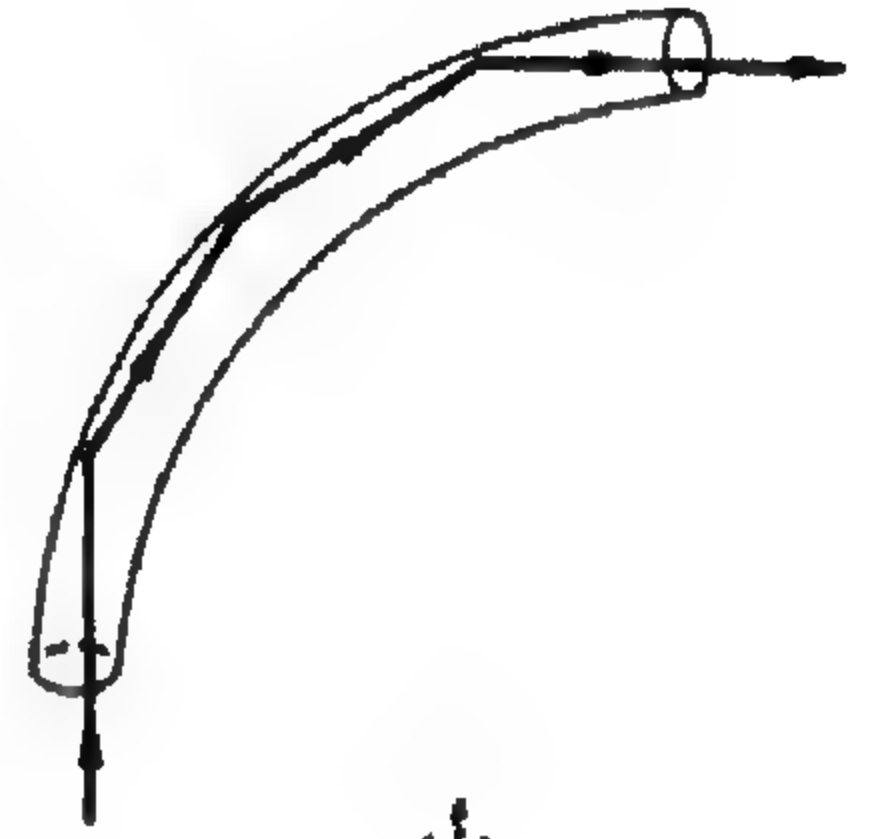
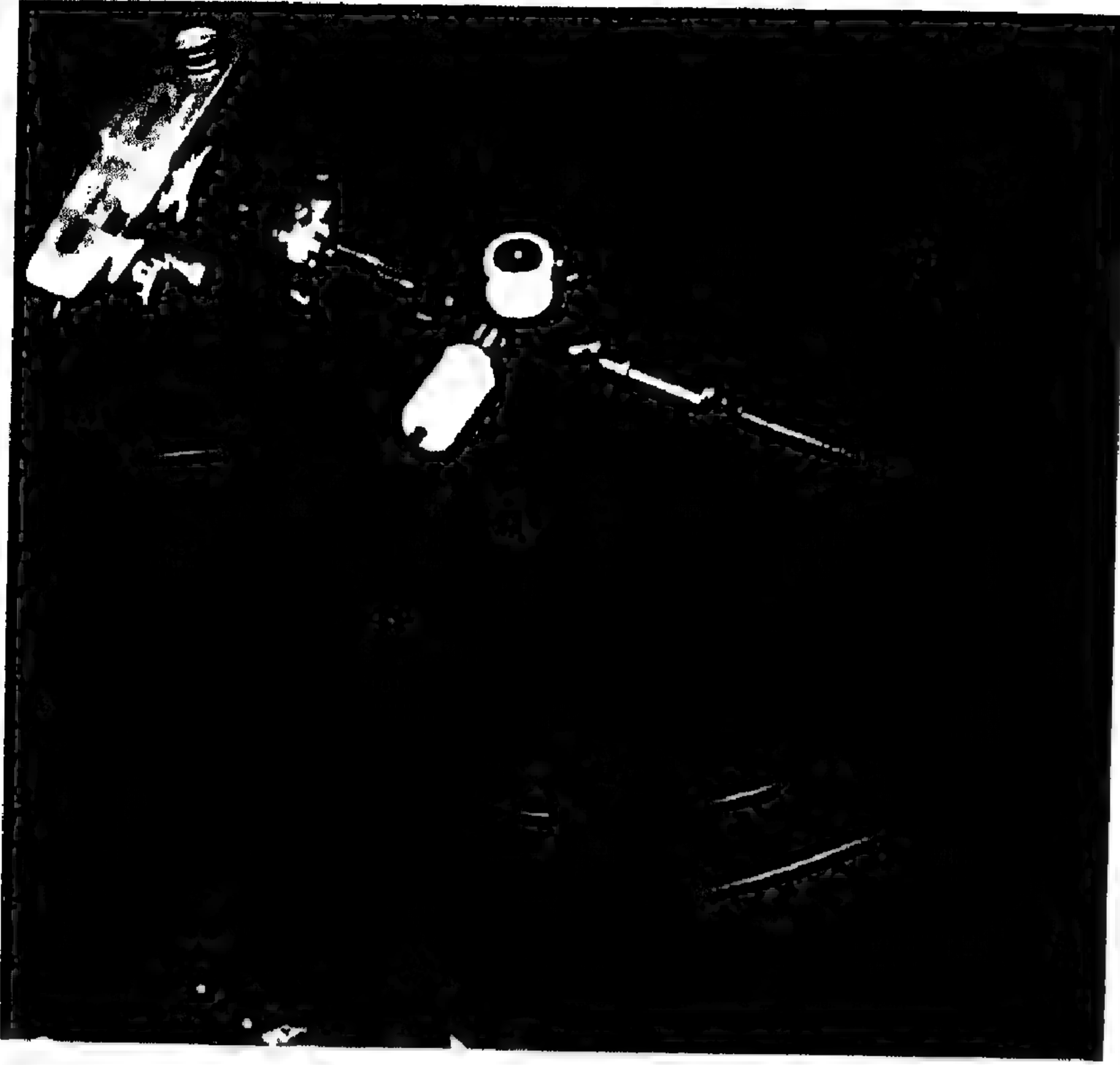
من هنا نرى أن شعاع الضوء الذى يحاول أن ينتقل من مادة كثيفة ضوئيا (مادة ذات معامل انكسار كبير) الى مادة أقل كثافة ضوئية سينعكس كليا داخلها اذا زادت زاوية السقوط عن الزاوية الحرجة المعطاة بالمعادلة (٢٣ - ٤) . لاحظ أن الانعكاس الكلى الداخلى يمكن أن يحدث فقط اذا كان الشعاع ينتقل من الماء الى الهواء وليس العكس . في كثير من الحالات يكون الهواء هو المادة الثانية ، أى أن $n_2 = 1.00$ وعندئذ $\sin \theta_c = 1/n_1$ تبلغ الزوايا الحرجة النموذجية للماء 49° ، للزجاج التاجى 42° وللحاس 24° ولما كان معامل انكسار الماس بهذا الكبر فان الزاوية الحرجة له تكون صغيرة ، أى أن شعاع الضوء يجب أن يصطدم مستقيما تقريبا بأسطحه حتى يتمكن من الخروج الى الهواء . ويقوم الجواهرى بقطع البلورة بطريقة معينة بحيث أنه بمجرد دخول شعاع ضوئى الى داخلها ، فان فرصة في أن يصطدم بالسطح بزاوية تبلغ 24° أو أقل تكون ضئيلة جدا . نتيجة لهذا ينعكس الشعاع الحبيس عدة مرات داخل البلورة قبل أن يتمكن من الهرب .

يجعل الانعكاس الكلى الداخلى من الممكن نقل الضوء بأنايب حول الزوايا . باستخدام قضيب زجاجى ينثنى بلطف ، فان الضوء الذى يدخل من أحد الاطراف ينعكس كليا داخلها حول المنحنى كما هو مبين في الشكل ٢٣ - ١٣ . وباستخدام حزمة من الألياف الزجاجية الضيقة فانه يمكن نقل صورة مركبة لجسم ما بالاناييب من مكان لآخر ، وتسمى هذه النبيلة انبوبة ضوئية يوضح الشكل ٢٣ - ١٣ ب مثالا لاستخدامها .

٢٣ - ٦ المرآة المستوية

بما أننا قد أصبحنا نفهم ظاهرتى الانعكاس والانكسار فاننا معدين لكى ندرس المعالم الهامة للعدسات والمرايا وسنبداً أولاً باعتبار كيفية تكون الصور بالمرآة المستوية .

انك تنظر كل يوم الى نفسك فى مرآة مستوية وترى صورة وجهك أمامك . وفى الحقيقة لو أنك توقفت لكى تفحص ما تفعله بدقة فستدرك أن صورة وجهك تقع خلف سطح المرآة وأنها تقع خلف المرآة بمسافة تساوى المسافة التى يقع بها وجهك امام المرآة . لنفحص هذا الانعكاس فى مرآة مستوية حتى نفهم بوضوح لماذا ترى الصورة كما هى .



(ب)

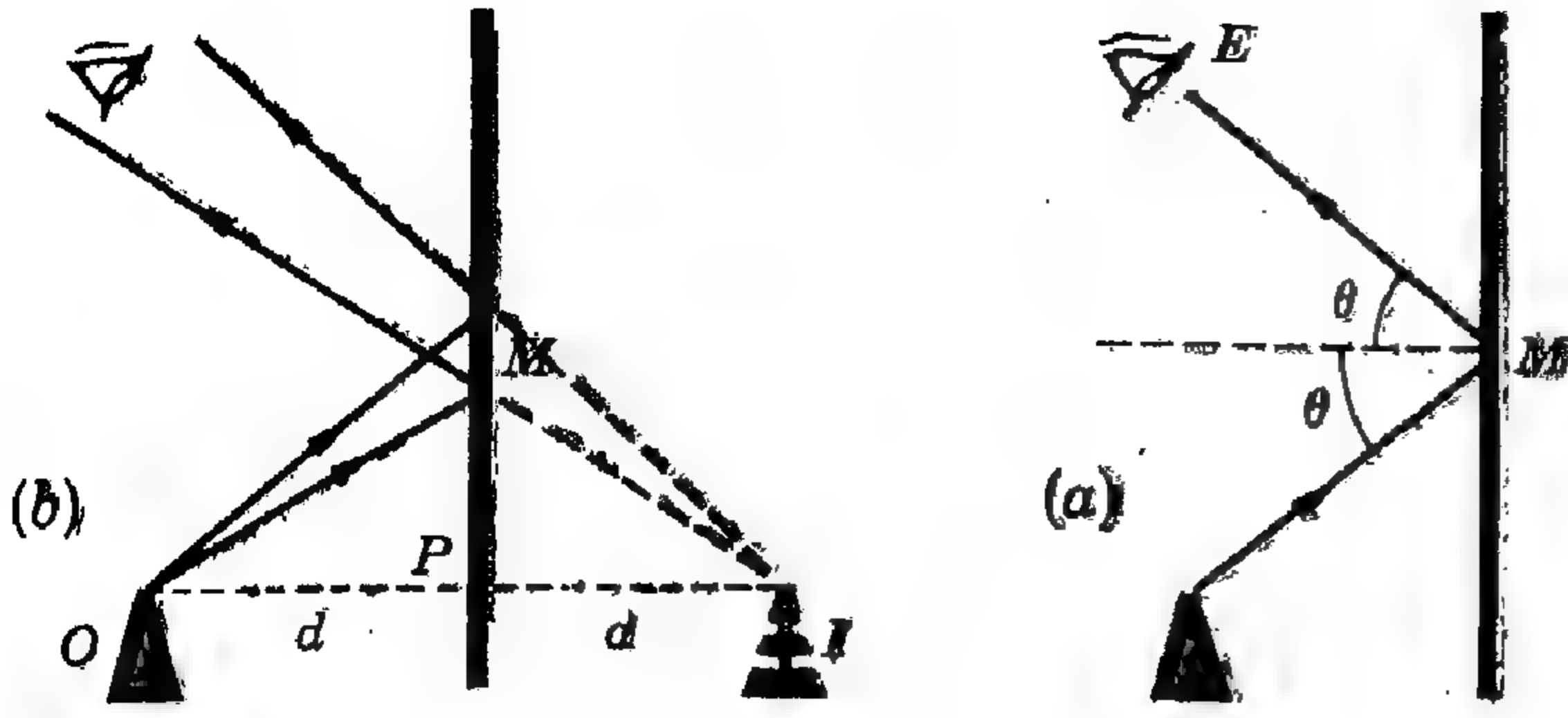
(أ)

شكل ٢٣ - ١٣

يدفع الضوء لتتبع ليفه
زجاجية بواسطة الانعكاس
الكل الداخلي . (ب) منظار
البطن (جاستروسكوب)
من الالياف الزجاجية متصل
بآلة تصوير . هناك مصدر
للضوء خارج الصورة الى
اليسار يقوم بامداد ضوء
لحزمة الالياف عند القاع .
تدخل هذه الانبوبة الضوئية
خلال الحلق الى المعدة .
الضوء المنعكس من جدران
المعدة سينعكس عالياً لأعلى
خلال الالياف المركزية للحزمة
مكون صورة على الفيلم في
آلة التصوير . ويمكن أيضاً
إجراء ملاحظات مرئية
مباشرة . (شركة أمريكان
اوبتيكال . قسم بصريات .
الالياف) .

افترض انك وضعت جسماً أمام المرآة كما في الشكل ٢٣ - ١٤ أ وانك أردت أن
تعرف أين ستري العين المرسومة موقع الصورة المتكونة . أنت حينما ترى طرف الجسم
فان عينك ترى شعاعاً ضوئياً قد ابتعث أو انعكس من طرف الجسم . أما اذا رأيت
صورة طرف الجسم في المرآة فانت في الواقع ترى الضوء الصادر من طرف الجسم بعد
انعكاسه في المرآة كما في الشكل ٢٣ - ١٤ أ . من الواضح أنك في نفس الشكل ترى
الجسم كما لو كان في نفس الاتجاه العام الذي يأتي منه الشعاع ، ومن ثم فأنت تعرف
أن صورة طرف الجسم ستكون في مكان ما على طول الخط EM أو امتداده .

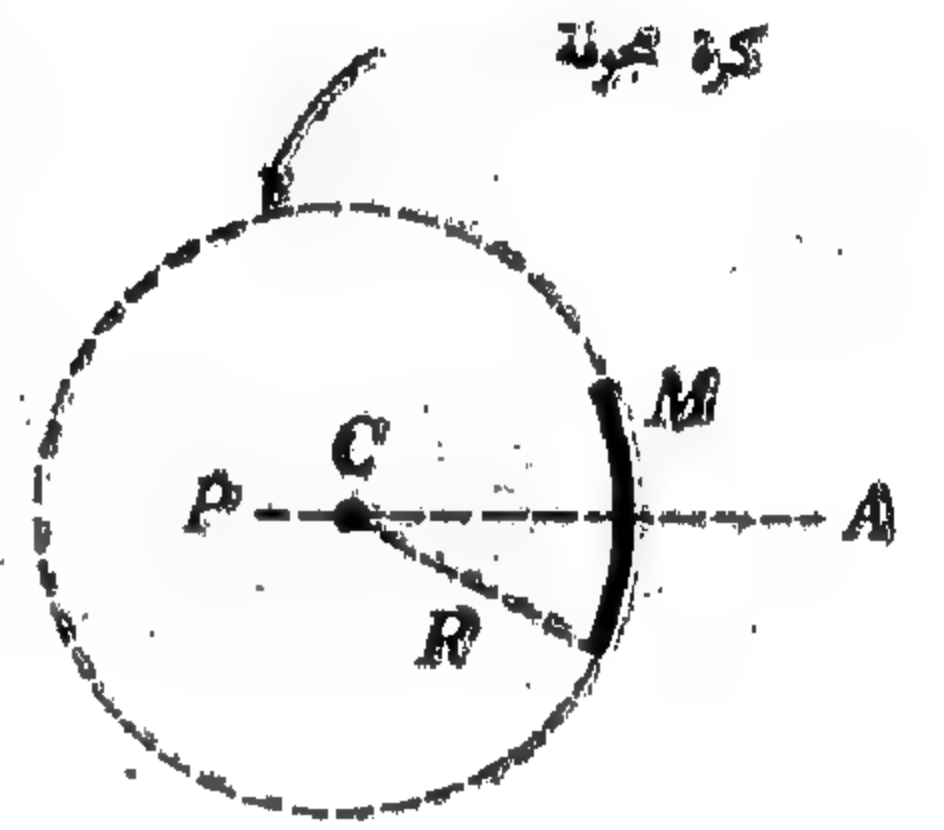
بالرجوع الى الشكل ٢٣ - ١٤ أ يمكنك معرفة أين ستكون صورة الجسم بدقة .
يظهر الشعاعان المنعكسان المبينان للعين على أنهما قادمان من نقطة واحدة I وهي
النقطة التي تظهر عندها صورة طرف الجسم . في الحقيقة ، يمكن استخدام نفس
الفكرة في بيان أن صورة الجسم كلها ستظهر عند I كما هو موضح . من هندسة
المثلثين IMP, OMP يتضح أنه لو كان بعد الجسم هو dcm أمام المرآة فان الصورة
ستكون على مسافة dcm خلف المرآة .



شكل ٢٣ - ١٤
تكون الصورة التكوينية في
المراة المستوية خلف المراة على
نفس البعد الذي يقع فيه
الجسم أمامها

وهذا النوع من الصور التي لا يمر خلالها حقيقة أى من الأشعة المرئية يسمى صورة تقديرية أو تخيلية . بصورة أخرى فإن الأشعة التي تصل الى العين لم تأت في الواقع من النقطة التي ترى الصورة فيها . وليست هناك مطلقاً أية امكانية أن نضع صفحة من الورق عند I خلف المراة بحيث يظهر عليها جسم مضاء . ولكن العقل يتخيل مجرد أن الضوء يأتي من I ومن الصحيح دائماً بالطبع أن صورة جسم حقيقي كما ترى بالانعكاس في مرآة مستوية هي صورة تقديرية وتكون دائماً خلف المراة على نفس البعد بالضبط الذي يقع في الجسم أمامها .

صورة تقديرية أو (تخيلية)



٢٣ - ٧ بؤرة مرآة كروية مقعرة

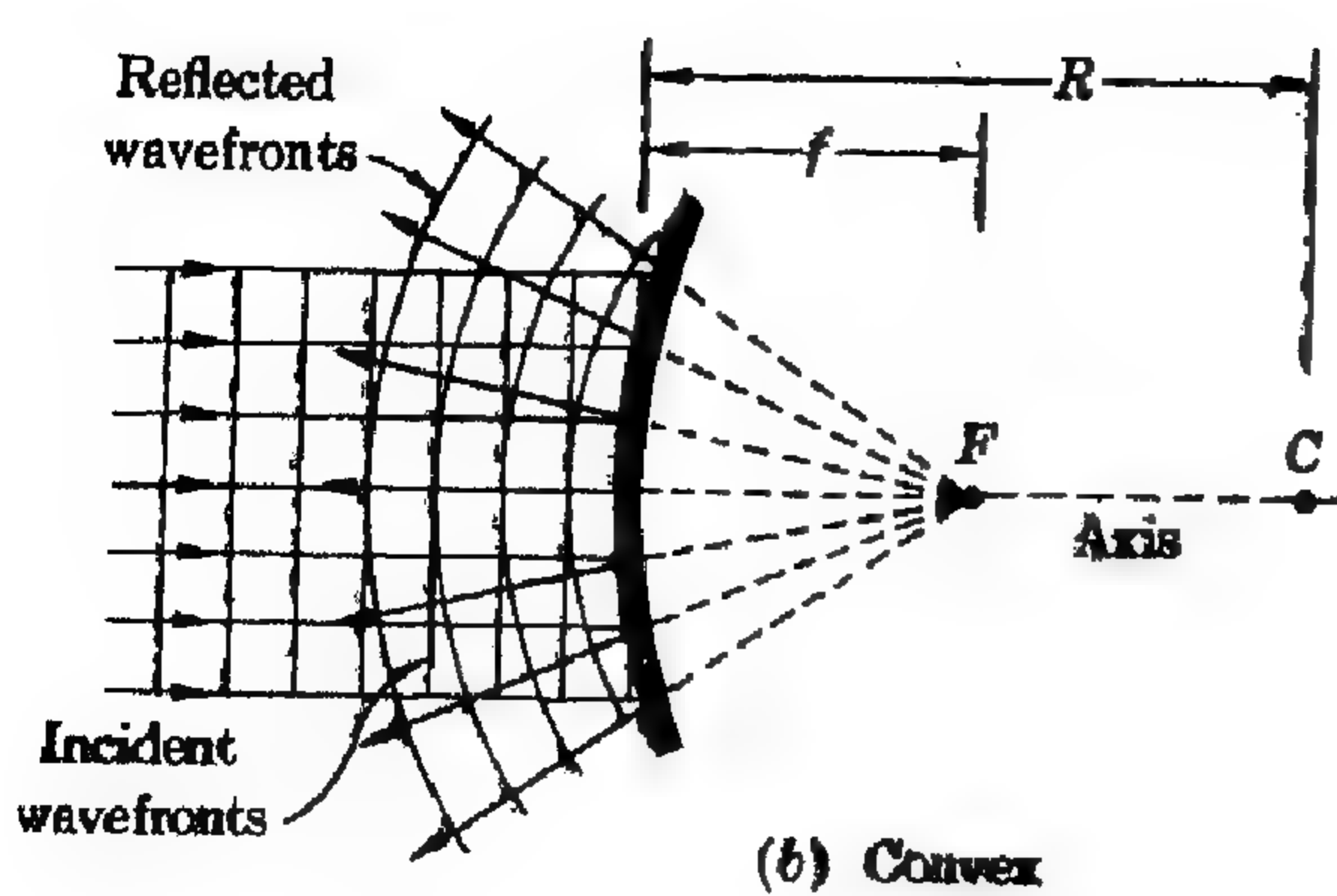
على الرغم من أن المرايا المستوية أو المسطحة مألوفة لدينا جميعاً إلا أن المرايا الكروية تعتبر بشكل أو بآخر مجرد حجب استطلاع للكثيرين ، على أنها كثيراً ما تستخدم للأغراض الصناعية ولذا سنقوم بوصف عملها . تعتبر المرآة الكروية ، في الواقع ، جزء من سطح كرة مجوفة كما بين الشكل ٢٣ - ١٥ . لو أن المرآة تعكس من على سطحها الداخلى لعكست الضوء كما في الشكل ٢٣ - ١٦ أو مثل هذه المرآة تسمى مرآة كروية مقعرة . أما حين تعكس من على سطحها الخارجى فانها تعكس الضوء كما في الشكل ٢٣ - ١٦ ب وتسمى المرآة من هذا النوع مرآة كروية محدبة .

شكل ٢٣ - ١٥

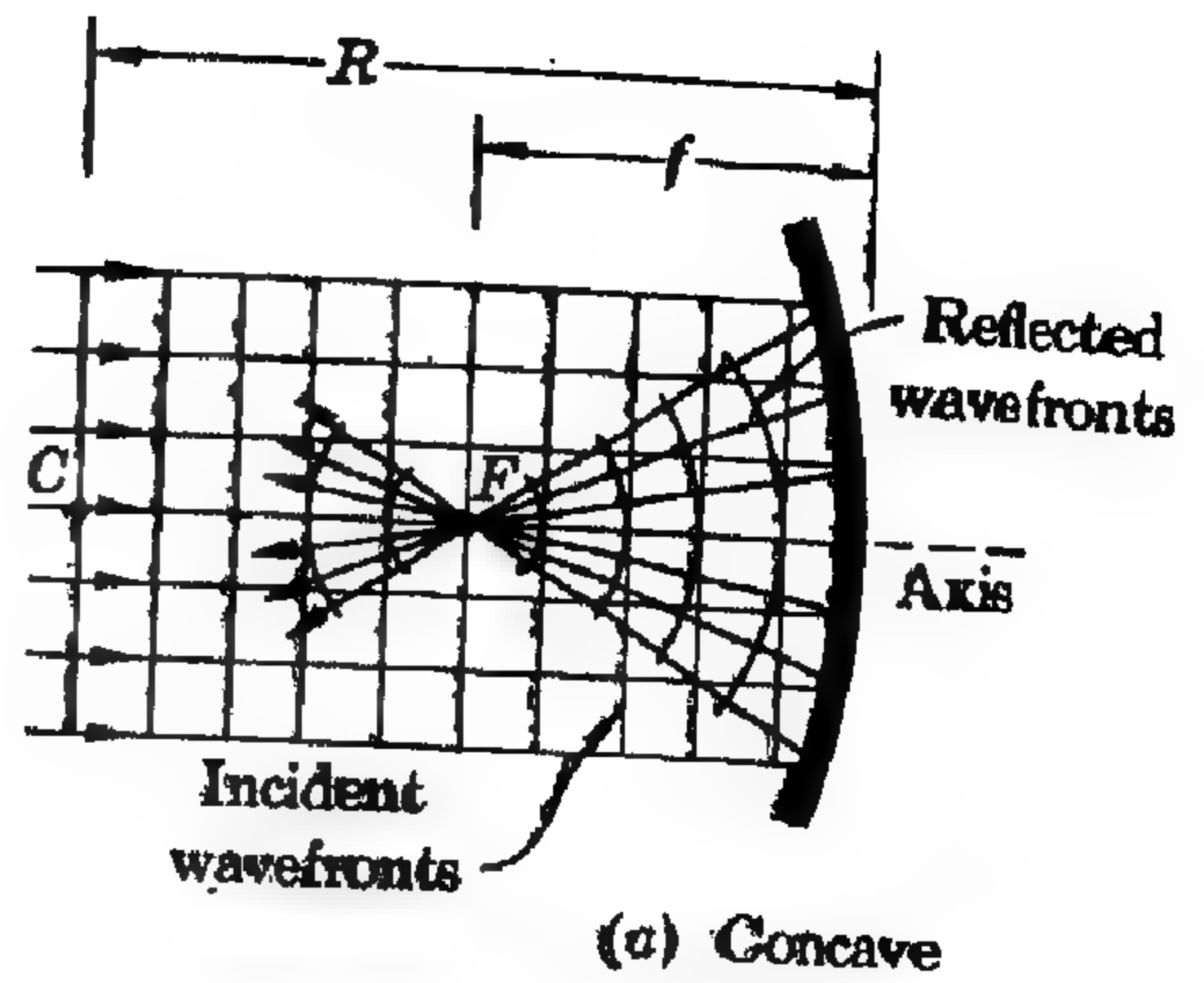
لمرآة الكروية MC هي جزء من
كرة مجوفة يكون نصف قطر
المرآة هو R ومركزها عند
النقطة C أما محورها الرئيسى
فهو الخط PA

لاحظ أنه عند رسم الشكل ٢٣ - ١٦ افترضنا أن الضوء قادم من مصدر بعيد بحيث تكون الأشعة متوازية وتكون مصدر الموجة مستقيمة أو مستوية . (تذكر أن أمواج الماء تفقد انحناءها كلما بعدت أكثر فأكثر عن مصدر الموجة .) يوضح الشكل أن الأشعة المتوازية التي تتقل على طول المحور الرئيسى للمرآة (كما عرف في التعليق على الشكل ٢٣ - ١٥) سوف تنعكس جميعها الى أو من نقطة F على وجه التقريب كما سنرى . الآن . تسمى هذه النقطة التي ينعكس اليها الضوء القادم من جسم بعيد بواسطة مرآة مقعرة البؤرة (أو النقطة البؤرية) للمرآة . لو كان علينا أن نعكس ضوء الشمس بواسطة مرآة مقعرة فإن الضوء سينعكس في نقطة هائلة (وهي صورة الشمس) قريبة جداً من بؤرة المرآة . وسبب هذا أن أمواج

تعريف



(b) Convex



(c) Concave

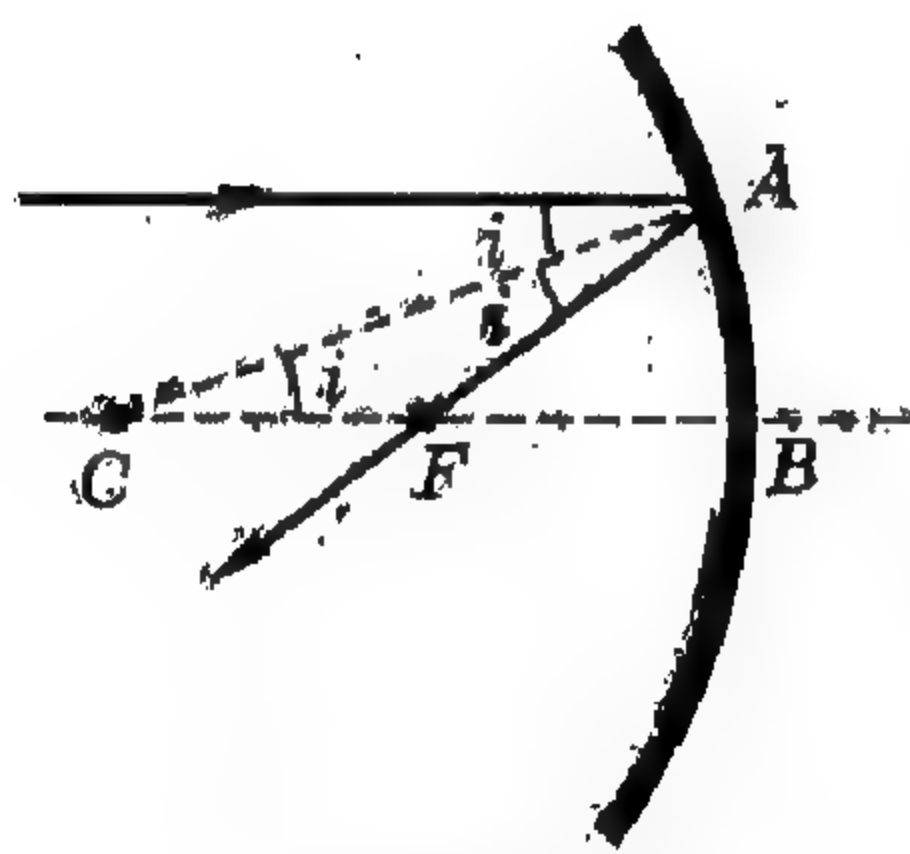
شكل ٢٣ - ١٦

يتجمع الضوء المنعكس من
على مرآة مقعرة في البؤرة بينما
ينعكس الضوء من مرآة محدبة
بحيث يبدو متفرقا من البؤرة

الضوء الصادرة من جسم بعيد كالشمس لا بد وأن تكون مستوية تقريبا حين تصل إلى الأرض .
وتكون الأشعة الصادرة من الشمس البعيدة أقرب ما تكون متوازية لدرجة يمكن اعتبارها كذلك .

لقد سألتنا الطالب حتى الآن أن يتقبل التأكيدات السابقة بقون برهان . على أنه من أبسط الأمور أن نصور تماما كيف يمكن لثلاثة أنواع خاصة من العدسة اللانهاية للأشعة الصادرة من مصدر ما أن تنعكس بواسطة مرآة مقعرة ، فإذا عرف هذا لأصبح من السهل أن نتحقق من موضع الصورة المتكونة بمثل تلك المرآة . سنرى الآن كيف تقوم المرآة المقعرة بعبكس هذه الأشعة الثلاثة الهامة .

(أ) مقعرة ، (ب) محدبة
(١) مصدر للوجه المنعكس ،
(٢) محور ، (٣) مصدر للوجه الساقط



شكل ٢٣ - ١٧

ينعكس الشعاع الموازي
للمحور الرئيسي لمرآة مقعرة
لعمر خلال النقطة البؤرية

اعتبر أولا ، الشعاع المبين في شكل ٢٣ - ١٧ ، وهو مواز لمحور المرآة ويصطدم بها عند النقطة A . لنرسم الآن نصف القطر CA من مركز الكرة التي تعتبر المرآة جزء منها . وحيث أن CA نصف قطر في الكرة لذا فهو عمودي على سطح المرآة عند A . يصنع الشعاع المنعكس مع العمود المقام عند A نفس الزاوية التي يصنعها الشعاع الساقط وذلك لأن زاوية السقوط على أي سطح عاكس مصقول تساوي زاوية الانعكاس ، وعلاوة على ذلك ، حيث أن الشعاع القادم مواز للمحور CB فإن الزاوية عند C يجب أن تكون أيضا ، كما هو موضح .

المثلث CFA هو مثلث متساوي الساقين ، يجب أن تساوي FA ولكن إذا كانت الزاوية ، صغيرة جدا فإن المسافة FA هي بالتقريب المسافة FB ، ومن ثم فأي شعاع مواز للمحور وليس بعيدا عنه سينعكس خلال نقطة F تقع في منتصف المسافة بين سطح المرآة B ومركز الكرة التي تشكل المرآة جزء منها . أو بطريقة أخرى إذا كان نصف قطر الانحناء للمرآة هو R فإن الأشعة الموازية لمحور المرآة سوف تنعكس

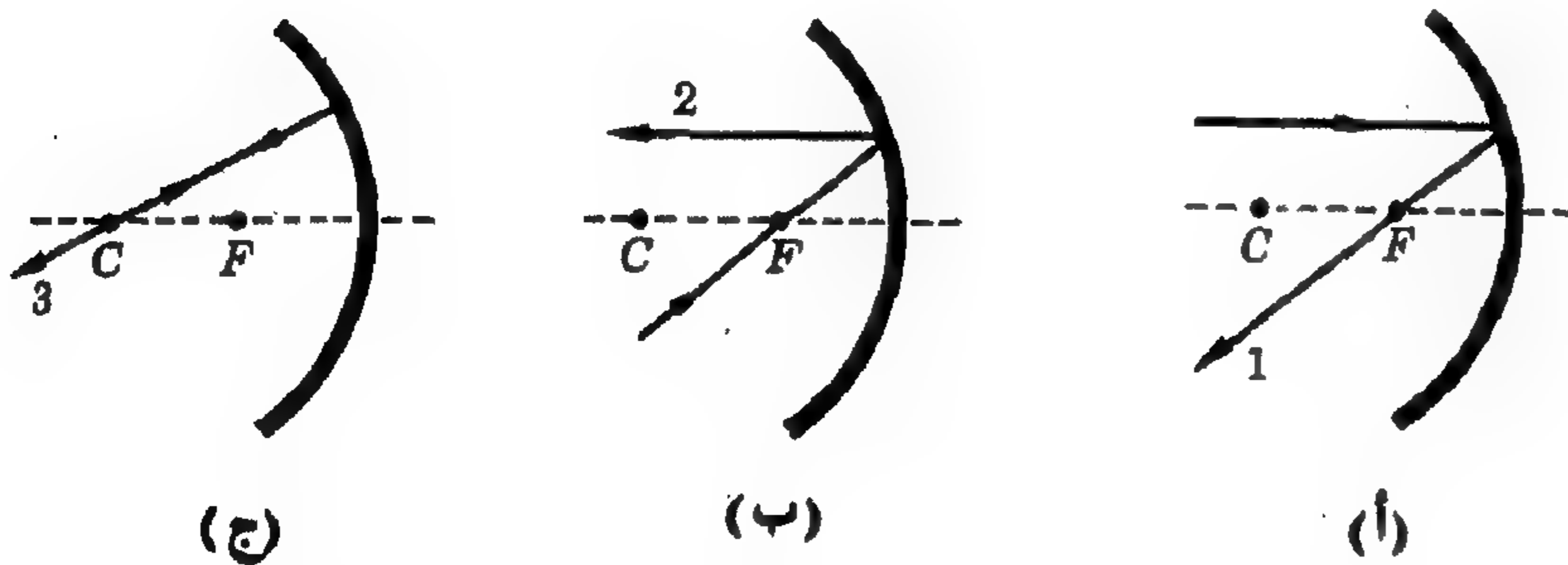
خلال نقطة F تبعد مسافة $\overline{FB} = \frac{1}{2}R$ عن المرآة. وهذه النقطة ، وهي النقطة التي تتركز فيها الأشعة المتوازية في بؤرة هي بؤرة المرآة أما البعد \overline{FB} فيسمى البعد البؤري للمرآة وعليه فان $f = \frac{1}{2}R$

البعد البؤري

ليس صحيحا تماما - بالطبع - أن جميع الأشعة الموازية للمحور تتركز عند نقطة البؤرة بالضبط فقد اتبع تقريب معين للوصول الى هذه النتيجة . لو أن المسافة AB في الشكل ٢٣ - ١٧ كانت كسرا صغيرا من قطر الدائرة فان التقريب يكون جيدا تماما . على انه لابد من رسم حالة شعاع ينعكس بزاوية $90^\circ \approx i$ لترى أنه في تلك الحالة لن ينعكس الشعاع خلال البؤرة ، ولهذا كانت المرايا الكروية المفيدة عبارة عن جزء صغير جدا من كرة أما المرايا الكروية الضخمة فتعطي صورا مشوشة ، ولكن المرايا التي لها شكل القطع المكافئ فانها لا تعاني من هذا العيب الا أن سعرها مرتفع .

٢٣ - ٨ الأشعة المنعكسة الثلاثة وتكوين الصورة

نعرف الآن الشعاع الموازي لمحور مرآة كروية وقريب منه جدا يمكن اعتبار أنه ينعكس خلال نقطة البؤرة . هناك أيضا شعاعان آخران يمكن تعقبهما بسهولة ، ويوضح الشكل ٢٣ - ١٨ أ الى (ح) كل هذه الأشعة الثلاثة .

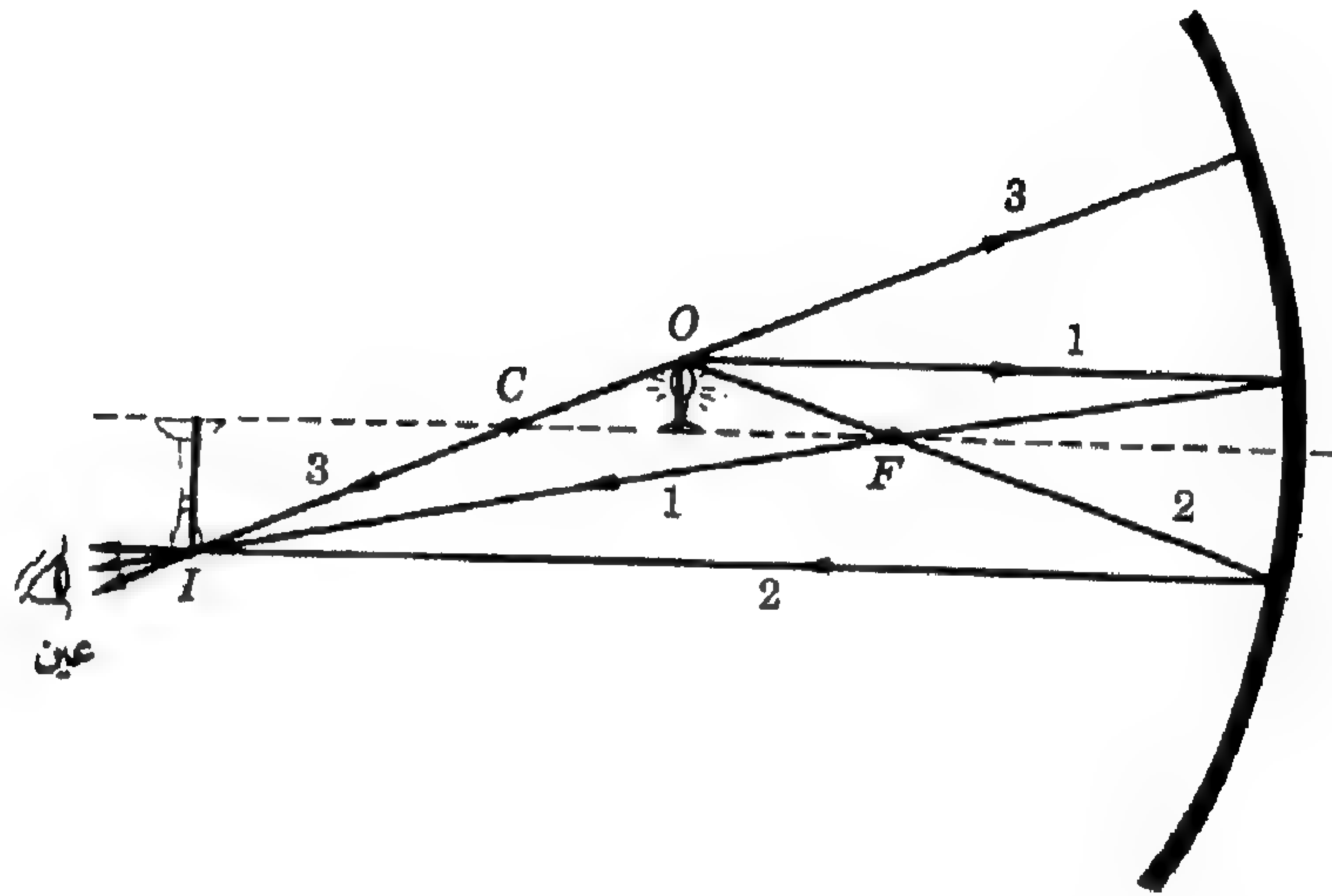


شكل ٢٣ - ١٨
يمكن بسهولة رسم الأشعة الثلاثة الميَّنة بواسطة مسطرة إذا كان كل من مركز المرآة C وبؤرتها F معلوماً .

الشعاع ١ ، في الجزء أ تمت مناقشته من قبل . أما الشعاع ٢ في الجزء (ب) فهو عكس حالة الشعاع ١ تماما . وكل الاعتبارات الهندسية التي قيلت في ١ تنطبق على ٢ . الشعاع ٣ في الجزء (ح) يمر خلال مركز انحناء المرآة ثم يصطدم بالمرآة ، ولما كان ينتقل على طول نصف قطر لسطح المرآة ، فهو يصطدم بالمرآة عموديا ثم ينعكس مرتدا على أعقابه تماما كما هو مبين لدينا اذن القواعد التالية للمرايا المقعرة ينعكس الشعاع الموازي لمحور المرآة خلال البؤرة . ينعكس الشعاع المار خلال البؤرة موازيا لمحور المرآة . ينعكس الشعاع المار خلال مركز انحناء المرآة مرتدا على أعقابه خلال مركز الانحناء

ويمكننا الآن استخدام هذه القواعد لتحديد مواقع الصور .

افترض أننا نريد إيجاد الصورة المتكونة بالمرآة للجسم O المبين في الشكل ٢٣ - ١٩ . وليكن هذا الجسم هو مصباح اضاءة . سيقوم المصباح ببعث الضوء في جميع الاتجاهات على أننا نعرف كيف نتناول ثلاثة فقط من ملايين الأشعة التي يمكن رسمها صادرة من المصباح . تنتقل هذه الأشعة الثلاثة كما هو مبين في الشكل ٢٣ - ١٩ ، حيث نرى أنها بالضبط الأشعة التي تحددها القواعد التي ذكرناها . عليك أن تتبع كل شعاع على حدة حتى تتأكد أنه مرسوم بطريقة صحيحة . ولا يلزم سوى معرفة موقع كل من C و F حتى نرسم هذه الأشعة باستعمال المسطرة .



شكل ٢٣ - ١٩
تكون صورة حقيقية I
للجسم O . تتبع الأشعة
الثلاثة الصادرة من الجسم

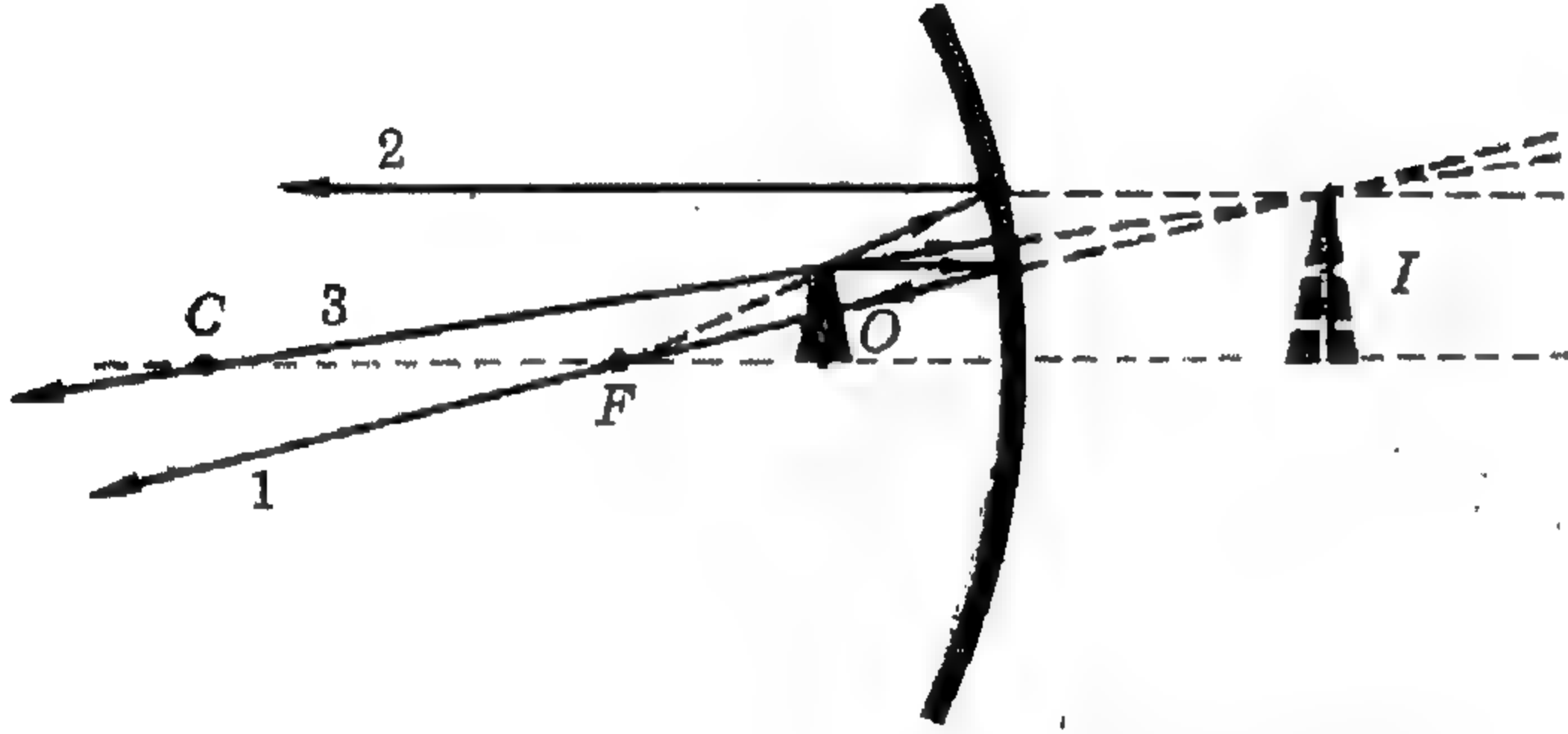
لو أنك الآن وضعت عينك في الموقع المشار اليه لبدا لك أن الأشعة الثلاثة صادرة من النقطة I ، بل أنك ستري في الواقع مصباح الاضاءة عند I وهذا ما يسمى صورة الجسم الموجود عند O . علاوة على ذلك ، حيث أن الأشعة الضوئية تتجمع حقيقة عند النقطة I ثم تمر خلالها ، لذا فعند وضع صفحة من الورق عند I سنلاحظ وجود صورة مضيئة للمصباح الأصلي وستكون هذه صورة حقيقية : عند الصورة الحقيقية يمر الضوء حقيقة خلال النقطة ليولد الجسم . لاحظ الفرق بينها وبين الصورة التقديرية التي ناقشناها في حالة المرآة المستوية .

تعريف

افترض الآن أن المصباح كان موضوعا عند طرف العمود المثل في شكل ٢٣ - ١٩ ستصدر الاشعة الضوئية من العمود كما تصدر من المصباح (قد يصطدم ضوء المصباح بالعمود ثم ينعكس عليه ، على سبيل المثال ، فيبدو كما لو كان صادرا من العمود نفسه أي سيبدو كما لو كان ضوء مبتعثا وليس منعكسا) . يمكننا معالجة كل جزء صغير من العمود كمصدر جديد للضوء ونجد صورته . عليك أن تتبع قليلا

من الأشعة حتى تثبت لنفسك أن صورة العمود تقع عند الصورة المبينة عند I ومن الآن فصاعدا سنقوم بتحديد نقطة واحدة لاية صورة ثم نرسم على الفور باقى الصورة بنفس الطريقة .

اعتبر الموقف المبين فى الشكل ٢٣ - ٢٠ حيث رسمت الأشعة الثلاثة مرة أخرى ولكن الشعاع 2 لا يمر الآن خلال البؤرة وهو فى طريقه الى المرآة وذلك لأن الجسم يقع داخل البعد البؤرى . على أنه لا يزال يبدو كما لو كان قادما من البؤرة وينعكس موزايا للمحور كما كان دائما . لاحظ أن الاشعة الثلاثة 3,2,1 تبدو على أنها قادمة من الصورة I كما فى الشكل ، ومن ثم ترى العين الصورة خلف المرآة فى هذه الحالة . مع ملاحظة أن الصورة تقديرية (تخيلية) ، معتدلة (الجانب الصحيح الى أعلى) ومكبرة (أكبر من الجسم) .



شكل ٢٣ - ٢٠
تبدو الأشعة الثلاثة كما لو
كانت قادمة من الصورة
التقديرية I لاحظ بشكل
خاص الشعاعين 3,2

٢٣ - ٩ معادلة المرآة

لنرجع الآن الى المثال الموضح فى الشكل ٢٣ - ٢١ حتى نتمكن من اشتقاق معادلة رياضية تصف موقع الصورة . ليس الشعاع ABE فى الجزء (أ) شعاعا عاديا ولكنه انعكس بحيث كانت الزاوية ABH تساوى الزاوية FBE ولهذا فالمثلثان المظللان فى الشكل ٢٣ - ٢١ أ متشابهان وبأخذ نسب الأضلاع المتناظرة نجد أن ،

$$\frac{O}{I} = \frac{p}{i}$$

فى الشكل ٢٣ - ٢١ ب يكون المثلثان المظللان أيضا متشابهين ومن ثم

$$\frac{O}{I} = \frac{\overline{HF}}{\overline{FG}}$$

ولكن \overline{HF} هى بالضبط $p - f$ هى تقريبا f وهذا التقريب نجد أن :

$$\frac{O}{I} = \frac{p - f}{f}$$

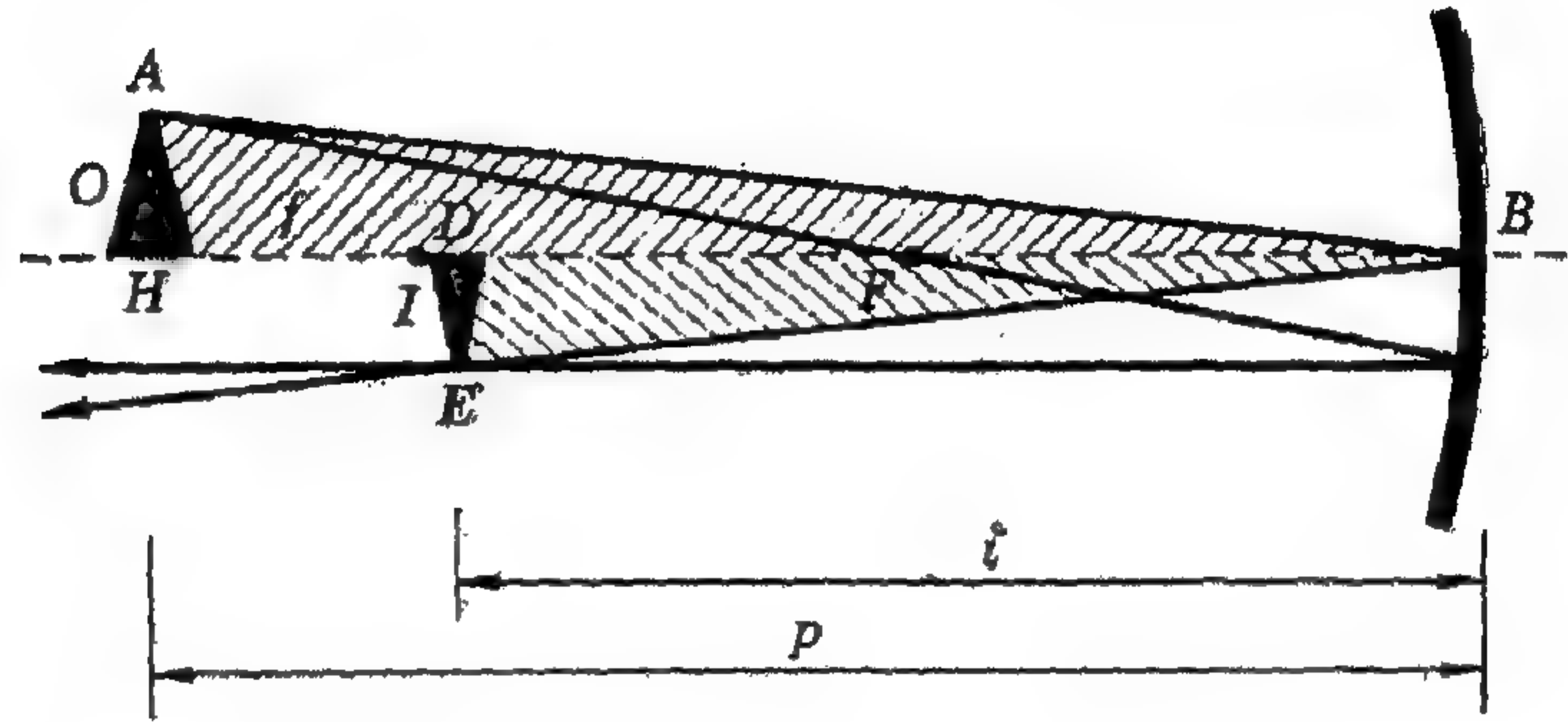
وبمساواة هذا بالمعادلة التي أوجدناها للجزء أ من الشكل نجد أن

$$\frac{p}{i} = \frac{p-f}{f}$$

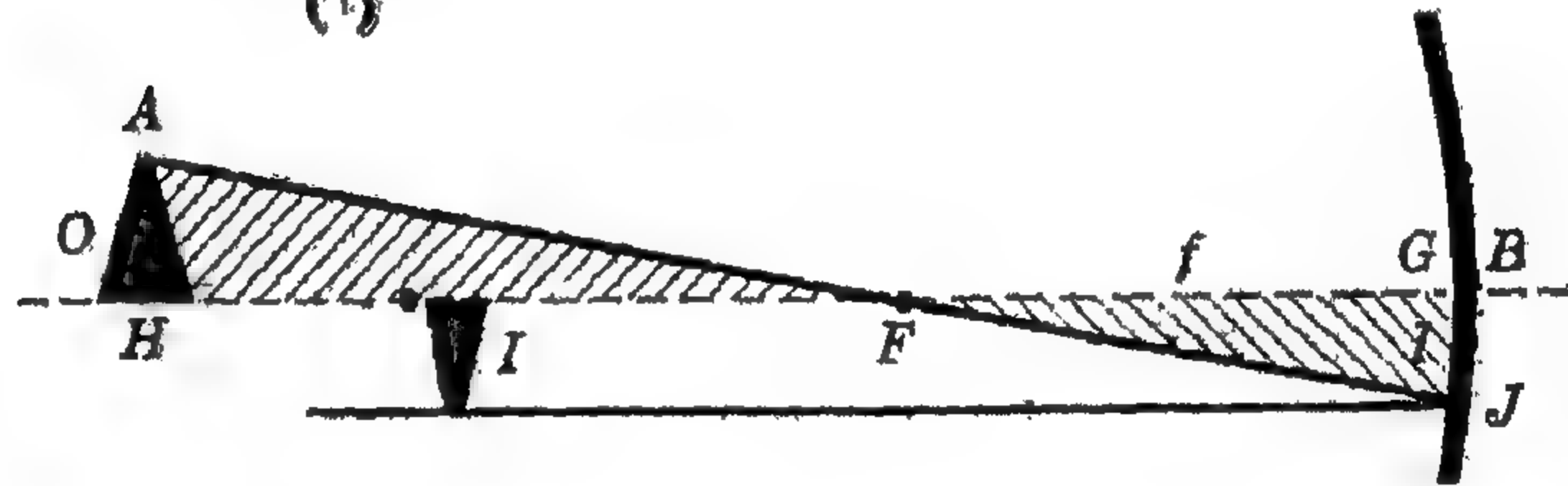
بقسمة هذه المعادلة على p وإعادة ترتيبها نجد أن :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad \text{معادلة المرآة} \quad (23 - 5)$$

حيث $f = \frac{1}{2}R$ و R نصف قطر انحناء المرآة .



(أ)



(ب)

شكل ٢٣ - ٢١
المثلثان المثلثان متشابهان في
كلتا الرسمين ، ولنفترض أن
المسافة \overline{FG} في الجزء (ب)
تختلف اختلافا مهما عن
المسافة \overline{FB} .

المعادلة (٢٣ - ٥) هي معادلة المرآة وهي تتيح لنا حساب المسافة i وهي بعد الصورة عن سطح المرآة بشرط أن يكون بعد الجسم عن سطح المرآة p وكذا البعد البؤري f معروفين . ولحساب الارتفاع النسبي للجسم وللصورة تشير الى أن $O/I = p/i$ كما أوجدنا من قبل .

ويعرف التكبير الذي تحدثه المرآة على أنه النسبة بين ارتفاع الصورة الى ارتفاع الجسم .
ومن ثم

$$\frac{i}{p} = \frac{I}{O} = \text{التكبير} \quad (23 - 6) \quad \text{تعريف التكبير}$$

مثال توضيحي ٢٣ - ٣ : وضع جسم طوله 2 cm على بعد 30 cm من مرآة مقعرة .
 نصف قطر انحنائها 10 cm أوجد موقع وحجم الصورة .
 طريقة الحل : تنطبق معادلة المرآة بوضع $p = 30 \text{ cm}$ ، $f = \frac{10}{2} = 5 \text{ cm}$
 ذلك بأخذ كل الأبعاد بالسنتيمترات ،

$$\frac{1}{i} = \frac{6}{30} - \frac{1}{30} = \frac{5}{30} \quad \text{أو} \quad \frac{1}{30} + \frac{1}{i} = \frac{1}{5}$$

$$i = 6 \text{ cm}$$

ستكون الصورة على نفس الجانب الذي يقع فيه الجسم أى على الجانب المفضض ،
 وحيث أن الضوء سيمر فعلا بالصورة لذا تكون حقيقة ، ويمكن إيجاد حجمها من
 المعادلة (٢٣ - ٦) ليكون

$$I = \frac{2}{5} \text{ cm high} \quad \text{أو} \quad \frac{I}{2} = \frac{6}{30}$$

من الحكمة دائما أن نتحقق من الحل الجبرى برسم المسار الصحيح للأشعة .
 مثال توضيحي ٢٣ - ٤ : وضع جسم على بعد 5.0 cm أمام مرآة مقعرة بعدها
 البؤرى 10 cm أوجد موقع الصورة .

طريقة الحل : اذا ما رجعنا الى الشكل ٢٣ - ٢٠ فإننا نرى أن هذا المثال يجب أن
 يعطينا صورة على الجانب الخطأ من المرآة أى ظهرها غير المفضض ، ويجب أن توضح
 اجابتنا هذه الحقيقة . باستخدام معادلة المرآة وبأخذ كل الأبعاد بالسنتيمترات فإن

$$\frac{1}{5} + \frac{1}{i} = \frac{1}{10}$$

وتعطى

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{10} - \frac{2}{10} = -\frac{1}{10} \quad \text{or} \quad i = -10 \text{ cm}$$

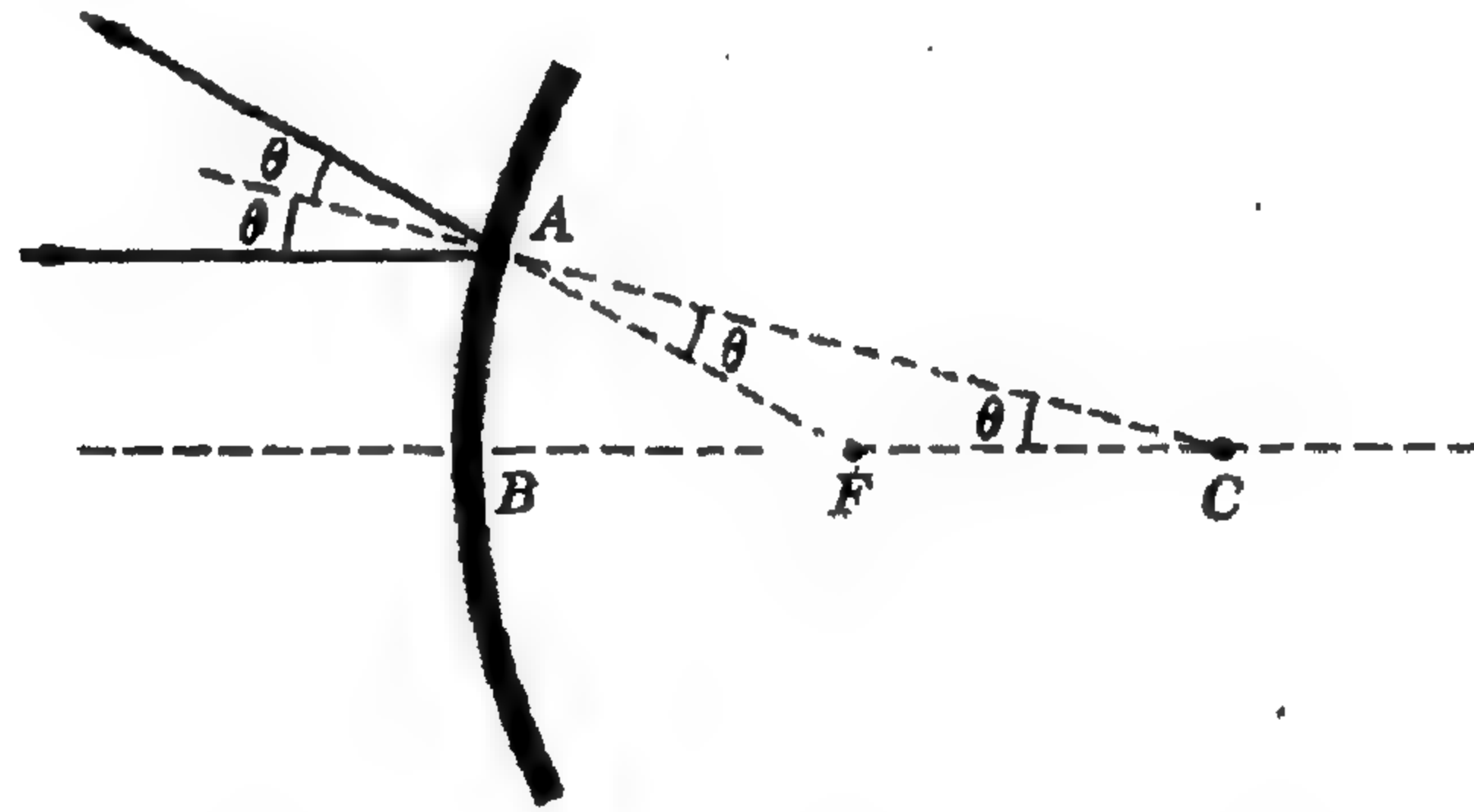
لاحظ أن i سالبة ، أى أنه عندما تكون الصورة خلف المرآة أى عند ظهرها ، فإن
 بعد الصورة يكون سالبا . وليس هذا بمستغرب فى ضوء حقيقة أن i أخذت موجبة فى
 الحالة العكسية . من الواضح أن الصورة يجب أن تكون تقديرية فى هذه الحالة ، إذ
 أنه من الطبيعى أن تكون الصورة المتكونة خلف المرآة تقديرية لأنها لن تظهر على سائر
 موضوع هناك .

٢٣ - ١٠ المرايا المحدبة

المراة الكروية المحدبة هي جزء من كرة يطل سطحها الخارجى بظلاء عاكس وهذا السطح يكون محدبا حين ينظر اليه من خارج الكرة لذا تسمى المراة محدبة . يوضح الشكل ٢٢ - ٢٣ سلوك الأشعة المتوازية حين تنعكس من على تلك المراة ، فهي تبدو كما لو كانت متفرقة من نقطة خلف المراة . وهذه النقطة يطلق عليها اسم النقطة البؤرية للمراة المحدبة . تنعكس الأشعة المتوازية الساقطة على مراة محدبة كما لو كانت آتية من النقطة البؤرية . ولا ثبات أن الأشعة المتوازية تنصرف بهذه الطريقة سنسلك نفس الطريق الذى اتبعناه مع المراة المقعرة .

بالرجوع الى الشكل ٢٢ - ٢٣ فإننا نرى من قانون الانعكاس ومن هندسة الشكل يتضح أن هناك عددا من الزوايا المتساوية كما هو مبين . والمثلث AFC متساوى الساقين أى أن $AF = FC$. أما البعد AB فصغير بالمقارنة مع نصف قطر انحناء المراة وكذلك AF يساوى تقريبا BF وعليه فإن BF يساوى بالتقريب FC أى أنه هنا أيضا يمكن اعتبار البؤرة في منتصف المسافة بين المراة ومركز انحنائها .

نستطيع اذن أن نكتب القواعد التالية لرسم الأشعة الثلاثة في حالة المراة المحدبة



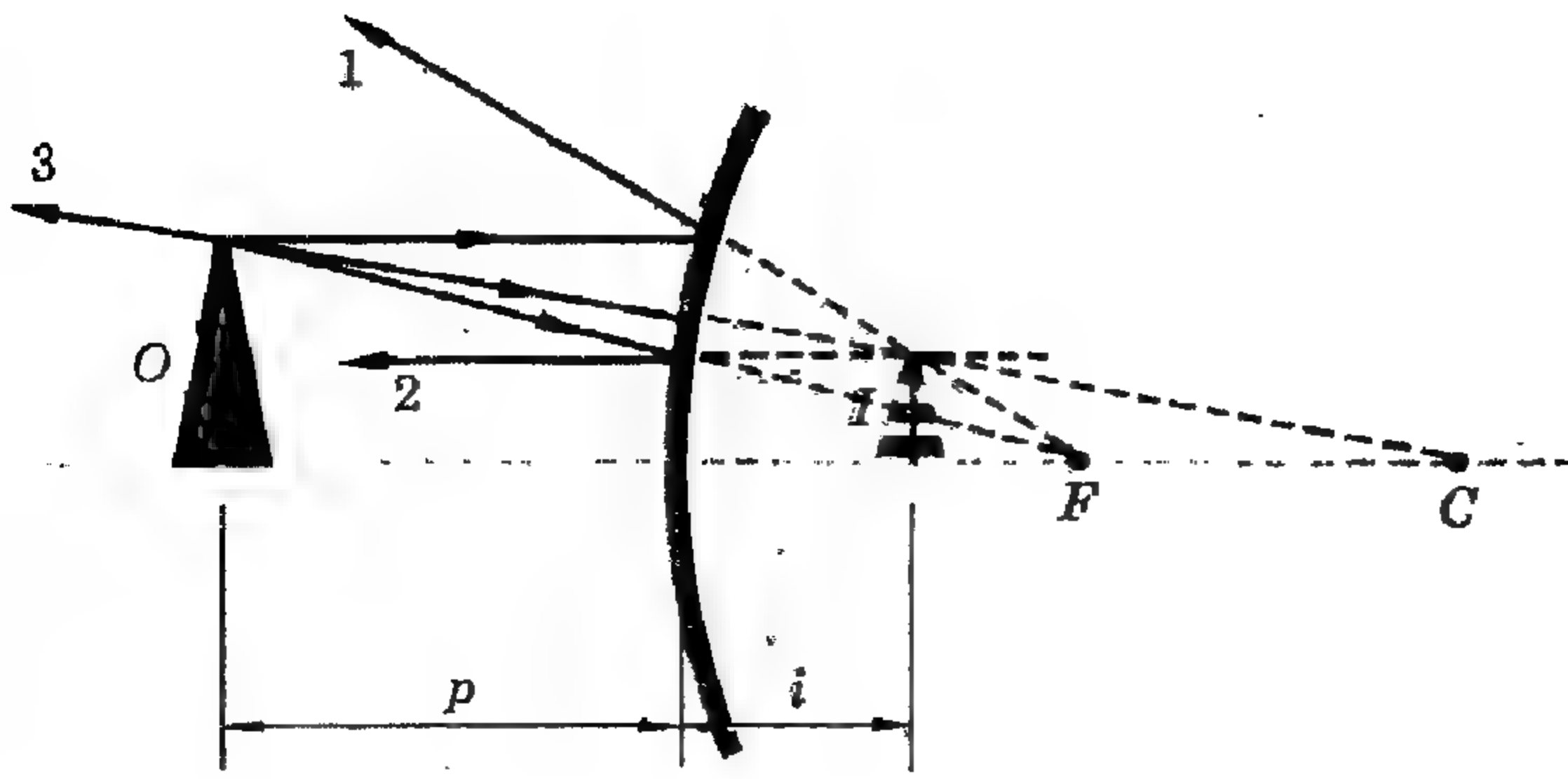
شكل ٢٢ - ٢٣
ينعكس الشعاع الموازى لمحور
المراة كما لو كان قادما من
النقطة البؤرية

ينعكس الشعاع الموازى لمحور المراة كما لو كان قادما من نقطة البؤرة .

ينعكس الشعاع المتجه رأسا نحو نقطة البؤرة موازيا للمحور .

ينعكس الشعاع المتجه رأسا نحو مركز الانحناء مرتدا على أعقابه .

يصور الشكل ٢٣ - ٢٣ هذه الأشعة الثلاثة ، وعليك تتبع كل منها لترى أنها تحقق هذه القواعد . لاحظ أن الأشعة المنعكسة الثلاثة جميعها تبدو قادمة من الصورة I خلف المراة . وكما ترى فالصورة تقديرية ، معتدلة ومصغرة في الحجم .



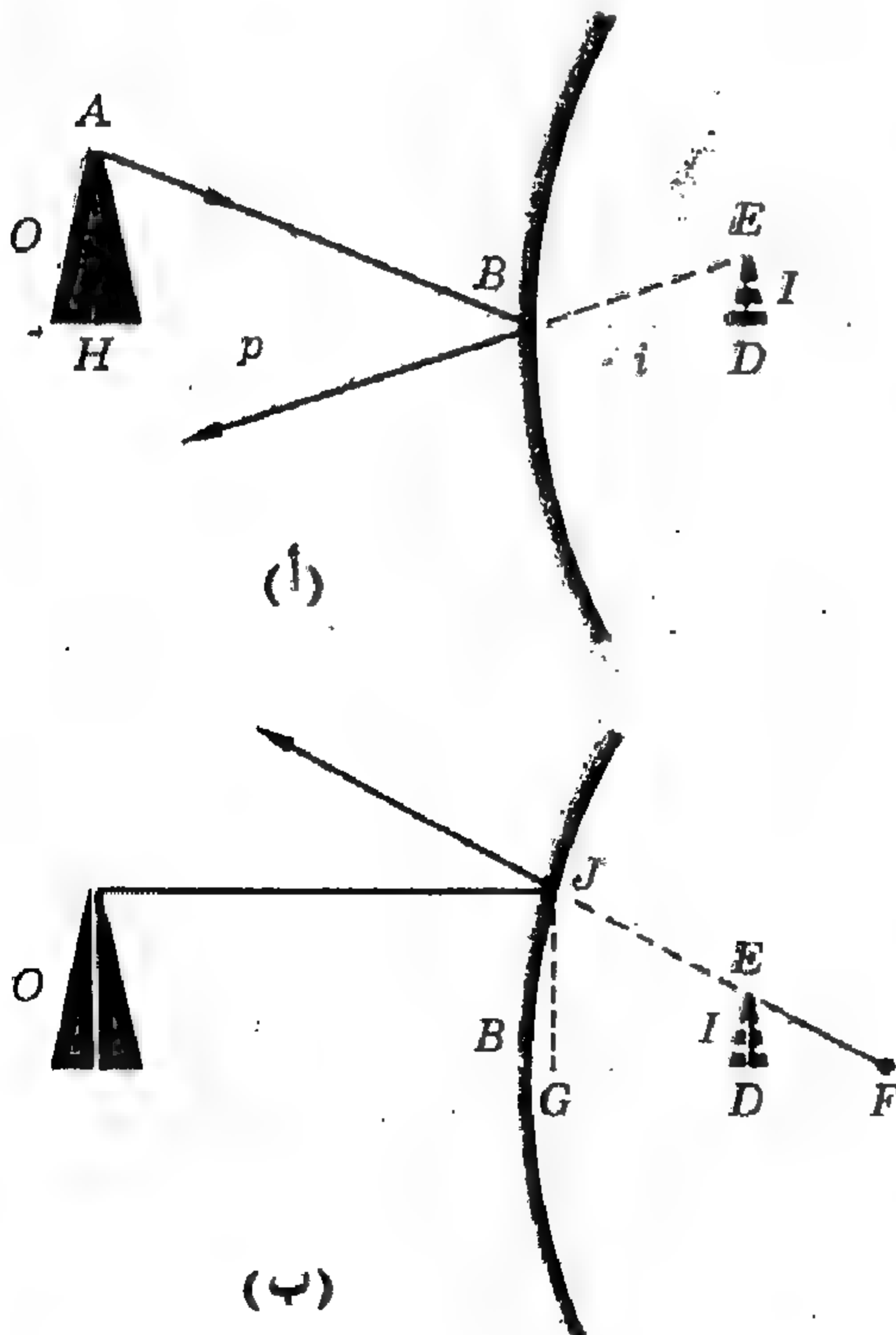
شكل ٢٣ - ٢٣
عليك أن تستطيع رسم
الأنشعة الثلاثة المينة وذلك
لأى موقف يتضمن مرآة
محدبة

يمكن الحصول على المعادلة الجبرية المستخدمة في تحديد موقع الصورة في حالة مرآة محدبة بالرجوع الى الشكل ٢٣ - ٢٤ أ و ب . عليك إثبات أن المثلثين ABH و EBD في الجزء (أ) متشابهان . وأن المثلثين JFG و EFD في الجزء (ب) متشابهان . فإذا ما كان هذا صحيحا يمكن إيجاد المعادلات التالية كما في حالة المرآة المقعرة :

$$\frac{O}{I} = \frac{f}{f-i} \quad \text{و} \quad \frac{O}{I} = \frac{p}{i}$$

وعند كتابة هذه المعادلات اعتبرت المسافة BG مهملة من حيث صغرها . بمساواة هاتين المعادلتين وقلبهما ثم القسمة على f وإعادة ترتيب الحدود نجد أن

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{i} = -\frac{1}{f}$$



شكل ٢٣ - ٢٤
المثلثان DBE و $IHBA$ متشابهان وكذلك المثلثان GFJ و DFE سنفترض أن المسافة \overline{FG} هي بالضرورة مثل \overline{FB}

لاحظ أن هذه المعادلة - بغض النظر عن الاشارات - هي نفسها المعادلة ٢٣ - ٥ للمرآة المقعرة ، وينبها اختلاف الاشارات الى حقيقة أن الصورة في هذه الحالة تقع خلف المرآة بدلا من أمامها كما أن الحد السالب للبعد البؤرى يعتبر نتيجة أن المرآة محدبة وليست مقعرة .

سنقوم الآن بوضع قواعد تسمح لنا باستخدام المعادلة (٢٣ - ٥) حتى في حالة المرآة المحدبة وذلك بدلا من تذكر معادلتين للمرايا . لو أننا وافقنا على اعتبار بعد الصور التى تتكون خلف المرآة - أى الصور التقديرية - سالبا فإننا نستطيع إلغاء الإشارة السالبة من الحد الذى يحوى في معادلة المرآة المحدبة . لو أننا علاوة على هذا - قلنا أن البعد البؤرى لمرآة محدبة يكون دائما سالبا فإن الاشارة السالبة الأخرى يمكن الغاؤها أيضا . ومن ثم يمكننا لجميع المرايا كتابة ما يلى :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad \text{mirrors}$$

(٢٣ - ٥) معادلة المرآة وقواعد الاشارات الخاصة بها

حيث اتفقنا على ما يلى :

١ - يكون بعد الجسم موجبا لو كان موضوعا على الجانب العاكس للمرآة وسالبا في الحالة المضادة .

٢ - يكون بعد الصورة موجبا لو كانت الصورة تقع على الجانب العاكس للمرآة وسالبا في الحالة المضادة .

٣ - يكون البعد البؤرى موجبا للمرآة المقعرة وسالبا للمحدبة .

يمكننا بالإضافة الى هذا استعمال المعادلة (٢٣ - ٦) لحساب التكبير فى كلتا الحالتين دون استخدام أية اشارات سالبة .

مثال توضيحي ٢٣ - ٥ استعملت مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 100 cm لعكس ضوء صادر من جسم موضوع على مسافة 75 cm أمام المرآة . أوجد موقع الصورة وحجمها النسبى .

طريقة الحل : حيث أن المرآة محدبة $f = -R/2 = -50 \text{ cm}$ باستخدام معادلة المرآة وأخذ كل الأبعاد بالسيتمترات ، يكون لدينا

$$\frac{1}{75} + \frac{1}{i} = -\frac{1}{50} \quad \text{أو} \quad i = -30 \text{ cm}$$

تفيدنا الإشارة السالبة أن الصورة تقع خلف المرآة وأنها - بالطبع - تقديرية . ويكون حجمها منسوبا الى ارتفاع الجسم هو ،

$$\frac{I}{O} = \frac{i}{p} = \frac{30}{75} = 0.40$$

من الحكمة التحقق من هذا الحل بيانيا للتأكد من عدم حدوث أخطاء .

٢٣ - ١١ النقط البؤرية لعدسة

العدسة المصنوعة على الوجه الصحيح تكون قادرة على تركيز حزمة من الضوء المتوازي في منطقة صغيرة عند النقطة البؤرية . والميكانيكية التي يتم بها هذا مصورة في الشكل ٢٣ - ٢٥ (أ) و (ب) ونحن نذكر أن موجة الضوء تنتقل بشكل أبطأ خلال الزجاج عنها خلال الهواء وعلى ذلك نجد أن الأجزاء الوسطى من موجة مستوية ساقطة كما في الشكل ٢٣ - ٢٥ أ- ستقع خلف الأجزاء الخارجية للموجة وذلك لأنها انتقلت مسافة أطول داخل الزجاج . وعلى ذلك تكون الموجة الصادرة من العدسة منحنية كما بالشكل . وحيث أن الأشعة أى اتجاه انتقال الضوء تكون عمودية على صدور الموجة لذا فإن الضوء يتجمع نحو النقطة F على المحور .

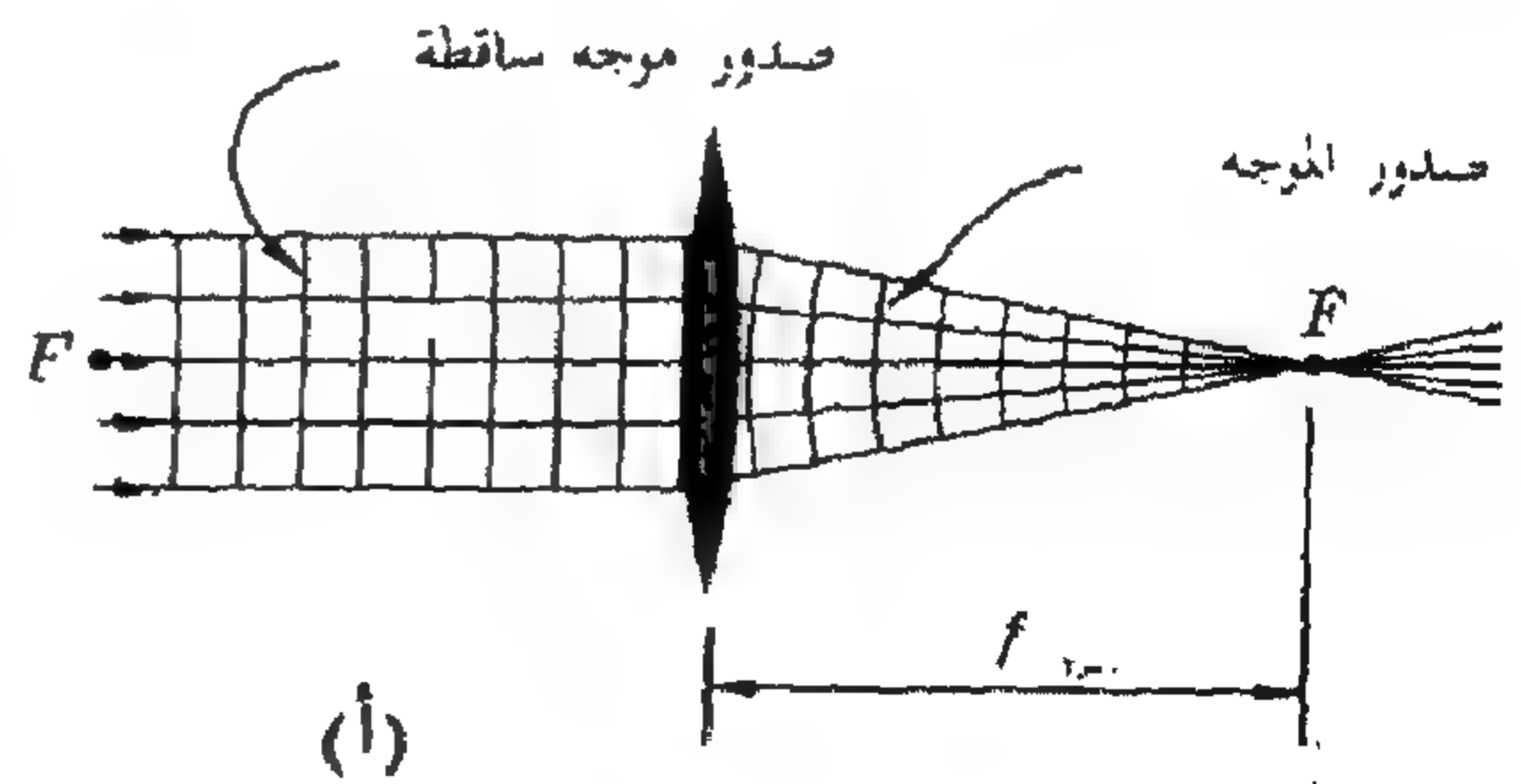
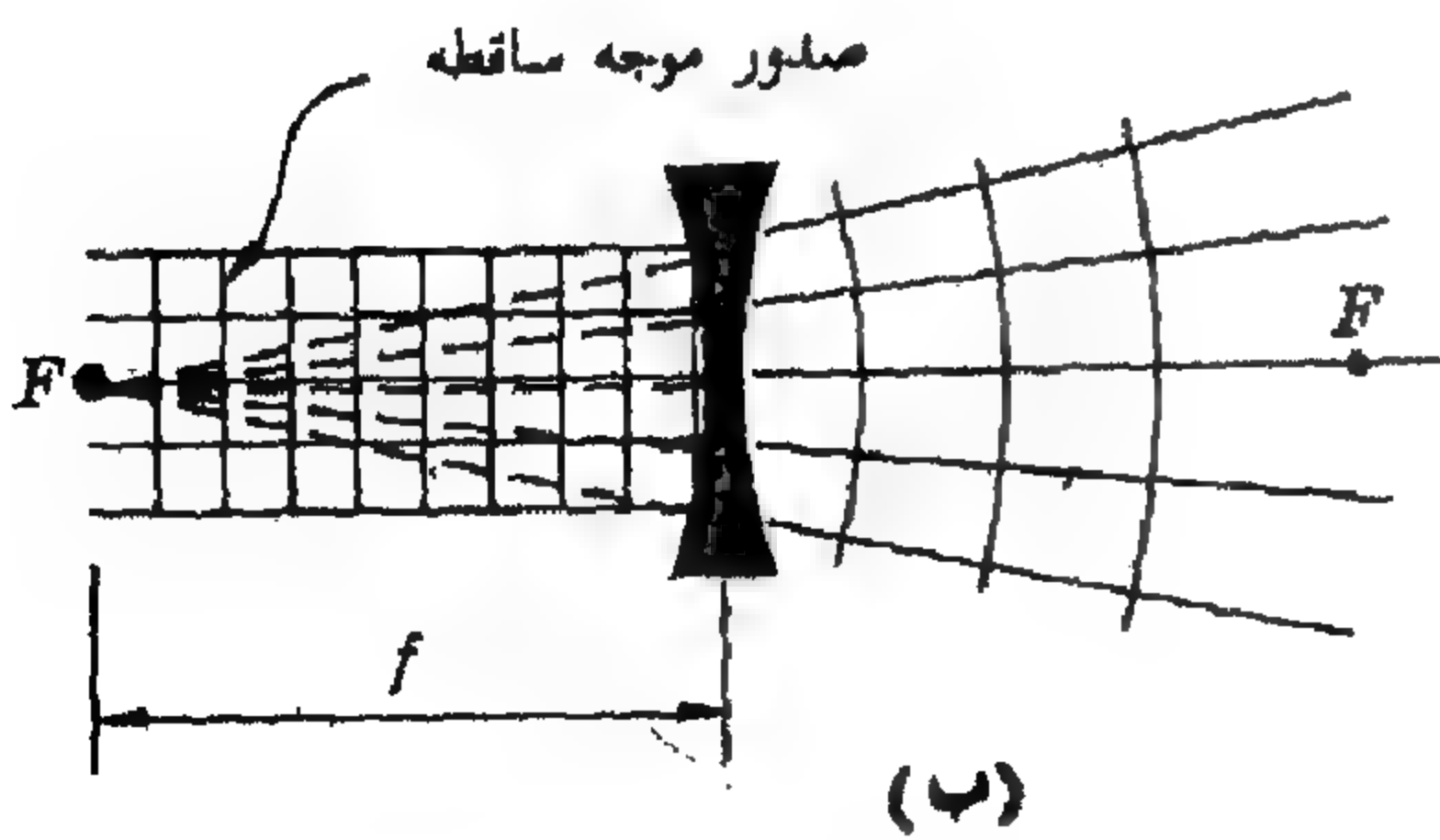
وعلى الرغم من أننا لن نبرهن هنا شيئا إلا أن الأشعة المختلفة سوف تتجمع في نقطة واحدة ، كما هو مبين ، إذا كانت أسطح العدسة أجزاء من كرات . على أن هذا ليس الا تقريبا ، يصبح تقريبا رديئا إذا أصبح السطح شديد الانحناء أو بطريقة أخرى لو أن أسطح تكون جزءا كبيرا من كرة . علاوة على ذلك ، فإننا نفترض العدسة رقيقة نسبيا . وفي هذه الظروف تتجمع الأشعة الموازية للمحور تقريبا في نقطة وتسمى النقطة التي تتجمع فيها الأشعة المتوازية بواسطة عدسة مجمعة النقطة البؤرية للعدسة .

تعريف

شكل ٢٣ - ٢٥

تتجمع الأشعة المتوازية بواسطة العدسة المجمعة ، وتنفرد وتبدو كما لو كانت آتية من النقطة البؤرية في حالة العدسة المفرقة

هناك طريقة بسيطة لتحديد موضع النقطة البؤرية لعدسة كتلك المبينة في الشكل ٢٣ - ٢٥ أ . لو أن ضوء الشمس مر خلالها فإن صورة للشمس تتكون ولما كانت الشمس بعيدة جدا فإن أمواج الضوء تكون بالضرورة مستوية والأشعة متوازية ومن ثم يكون الموضع الذي تتكون فيه صورة الشمس هو النقطة البؤرية للعدسة .

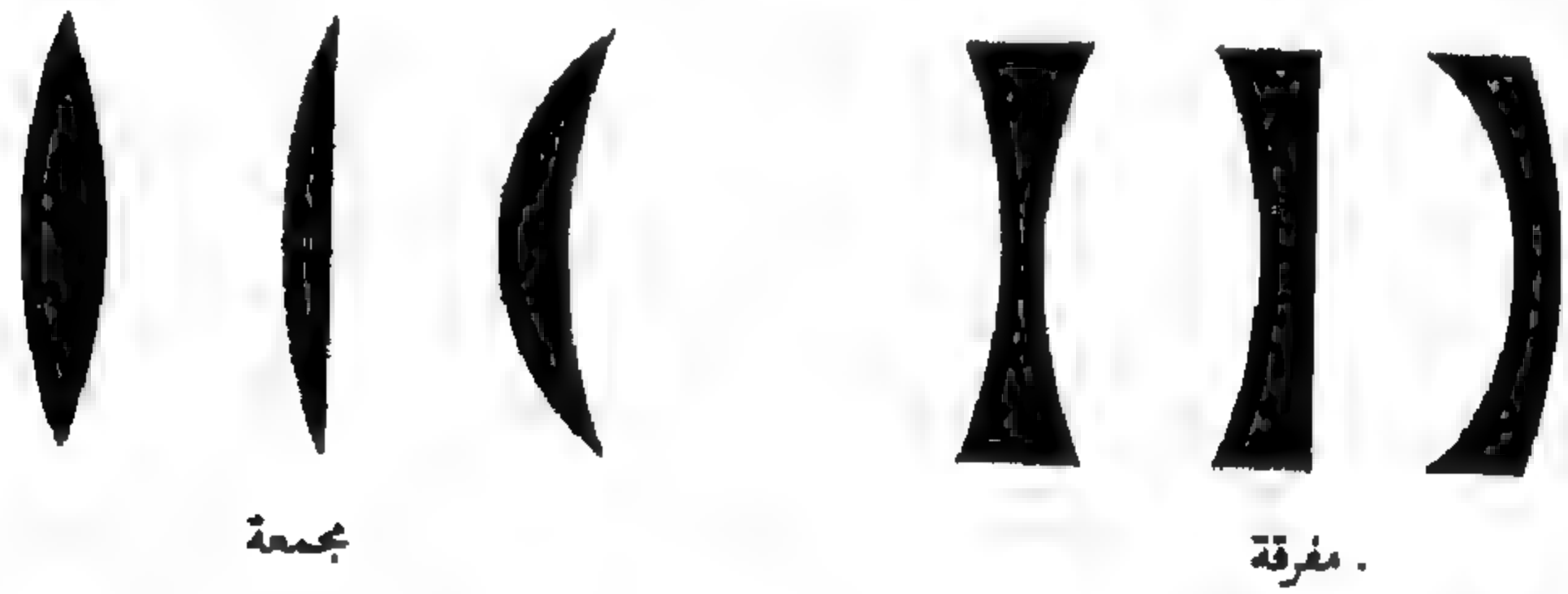


هناك نوع مختلف من العدسات في شكل ٢٣ - ٢٥ ب . لاحظ أنه لما كانت هذه العدسة أرق في المنتصف عنها عند الأطراف فإن الأجزاء الخارجية للموجة سوف تقع في الخلف ، والآن ستكون الموجة الصادرة من العدسة كروية الشكل ولكنها متفرقة . وتحت نفس القيود العامة التي ذكرت من قبل للنوع الآخر من العدسات ، فإن هذه الموجة المتفرقة ستبدو كما لو كانت قادمة من النقطة F في الشكل . وهذه النقطة التي يبدو الشعاع الأصلي المتوازي على أنه متفرق فيها تسمى النقطة البؤرية للعدسة المتفرقة .

تعريف

من هنا نرى أن هناك نوعين من العدسات يمكننا : العدسات المجمعة وهي أسمك ما تكون في المنتصف وتجعل حزمة متوازية من الضوء تتجمع في النقطة البؤرية ، والعدسات المتفرقة وهي أسمك ما تكون عند أطرافها وتجعل - حزمة ضوئية متوازية - تنتشر (أو تتفرق) كما لو كانت صادرة من نقطة هي النقطة البؤرية . وحتى لو أديرنا هذه العدسات حول نفسها فإنها ستظل تسلك نفس السلوك* ومن ثم يكون لكل عدسة نقطتان بؤريتان واحدة على كل جانب منها وتقع كلتاها على نفس البعد عن المركز . وتسمى هذه المسافة من مركز العدسة حتى النقطة البؤرية البعد البؤري للعدسة وبين الشكل ٢٣ - ٢٦ عدة أشكال مختلفة لعدسات شائعة . لاحظ أن العدسات المجمعة كلها أسمك ما تكون عند المنتصف .

شكل ٢٣ - ٢٦
العدسات المجمعة أسمك ما
تكون عند المنتصف والعكس
صحيح بالنسبة للعدسات
المتفرقة



افترض أن عدسة زجاجية غمرت في سائل له معامل انكسار مساو لمعامل انكسار الزجاج . في هذه الحالة ستنقل الموجة بنفس سرعتها في الزجاج وفي السائل ولهذا فهي لن تتعرض لأي اضطراب ، بالمرور خلال العدسة ولن تقوم العدسة بتركيزها في بؤرة . أي أن البعد البؤري لعدسة ما يعتمد على الوسط الذي توجد فيه ومن الشائع أن يكون هذا الوسط هو الهواء . على أن الأمور ليست هكذا دائما . يعطى البعد البؤري لعدسة مغمورة في وسط غير الهواء بالمعادلة ،

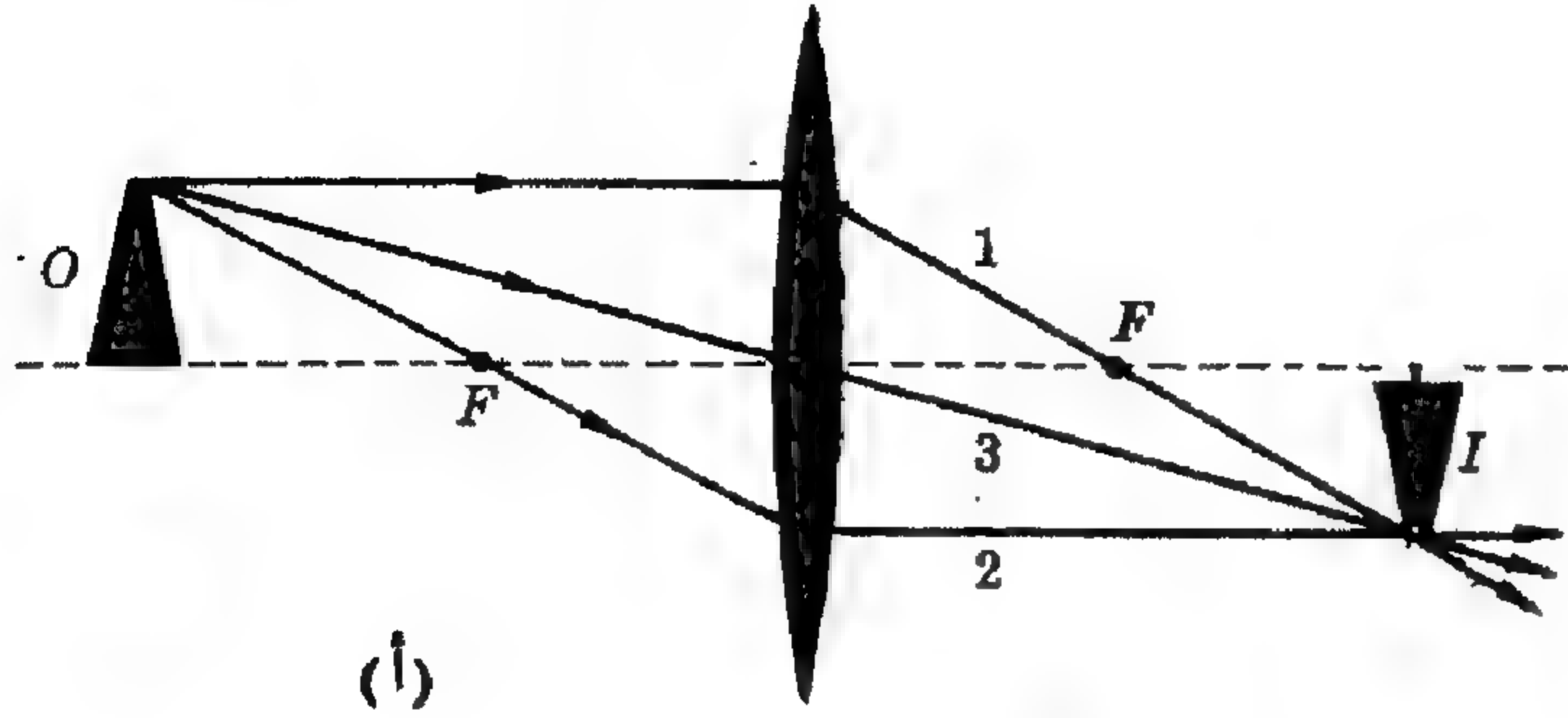
$$f_{\text{medium}} = \frac{f_{\text{air}} n_m (n_g - 1)}{n_g - n_m}$$

حيث n_m هو معامل انكسار الوسط ، n_g معامل انكسار الزجاج . هل يمكنك إثبات أن هذه العلاقة منطقية للحالات الحدية عندما $n_m \rightarrow n_g$ ، $n_m \rightarrow 1.00$ ؟

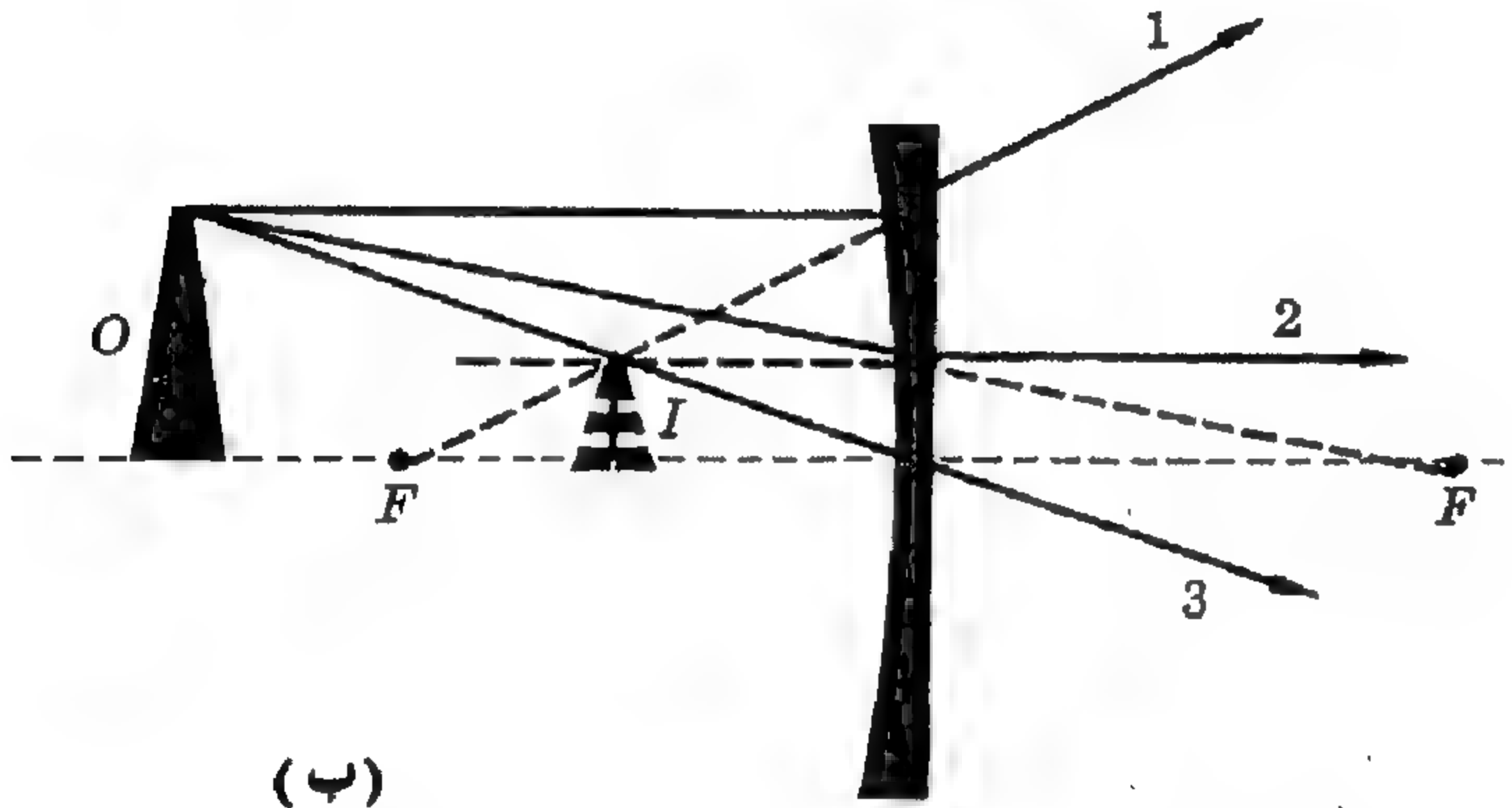
* حين تكون العدسات سميكة جدا بحيث يتقارب السمك مع البعد البؤري ، فإن هذه العبارة تكون مفيدة .

٢٣ - ١٢ رسم مسار الأشعة للعدسات الرقيقة

رأينا في القسم السابق أن شعاعا ينتقل موازيا لمحور العدسة سوف ينحني بواسطة العدسة ، فهو يتجمع نحو البؤرة بواسطة العدسة المجمعة ويتفرق في البؤرة بالعدسة المفرقة ، وهذه الأشعة مبينة كالشعاع في شكل ٢٣ - ٢٧ (أ) و (ب)



(أ)



(ب)

شكل ٢٣ - ٢٧

الموقع البياني للصورة التكون بواسطة عدسة رقيقة تتكون من رسم الأشعة الثلاثة المبينة

شكل ٢٣ - ٢٨

الشعاع المار خلال مركز العدسة يمر بالضرورة خلال لوح مسطح ولذا لا ينحرف . تحدث إزاحة صغيرة للشعاع ولكنها ليست مبينة بالشكل . لماذا كانت هذه الإزاحة مهمة بالنسبة لعدسة رقيقة ؟

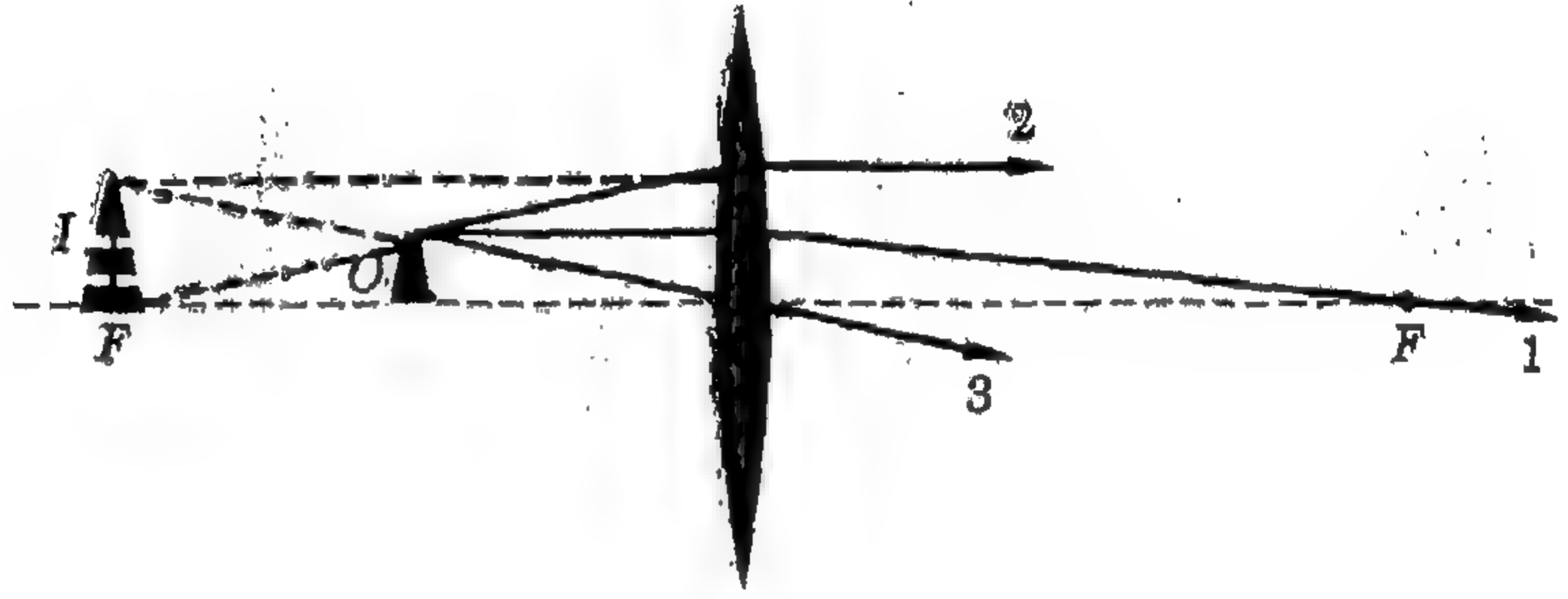
الشعاع الثاني هو عكس الشعاع 1 تماما . (فبالنسبة للعدسة المحدبة يأتي من المصدر مارا بالنقطة البؤرية الأخرى ثم يتجمع موازيا لمحور العدسة . لاحظ أنه مثل الشعاع 1 تماما ولكنه ينتقل في الاتجاه المضاد . بالنسبة للعدسة المفرقة يتجه الشعاع 2 رأسا إلى النقطة البؤرية الأخرى ولكنه لا يصل إليها مطلقا لأن العدسة تفرقه موازيا للمحور كما هو مبين وهو أيضا نفس الشعاع 1 ينتقل في اتجاه مضاد .

يأتي الشعاع الثالث من المصدر ثم يمضي مستقيما خلال مركز العدسة دون أي انحراف ، ومن السهل إدراك سبب هذا السلوك بالرجوع إلى الشكل ٢٣ - ٢٨ ، فأشعة الضوء التي تخترق مركز العدسة تدخل وتخرج من العدسة عند أسطح موازية لبعضها البعض . ومن ثم يسلك الشعاع كما لو كان يمرق خلال لوح مسطح من الزجاج . ولابد أننا نذكر أن الشعاع الضوئي لا ينحرف في الاتجاه بواسطة لوح مسطح ذي أوجه متوازية لهذا تمضي الأشعة الضوئية المارة خلال العدسة بدون انحراف .



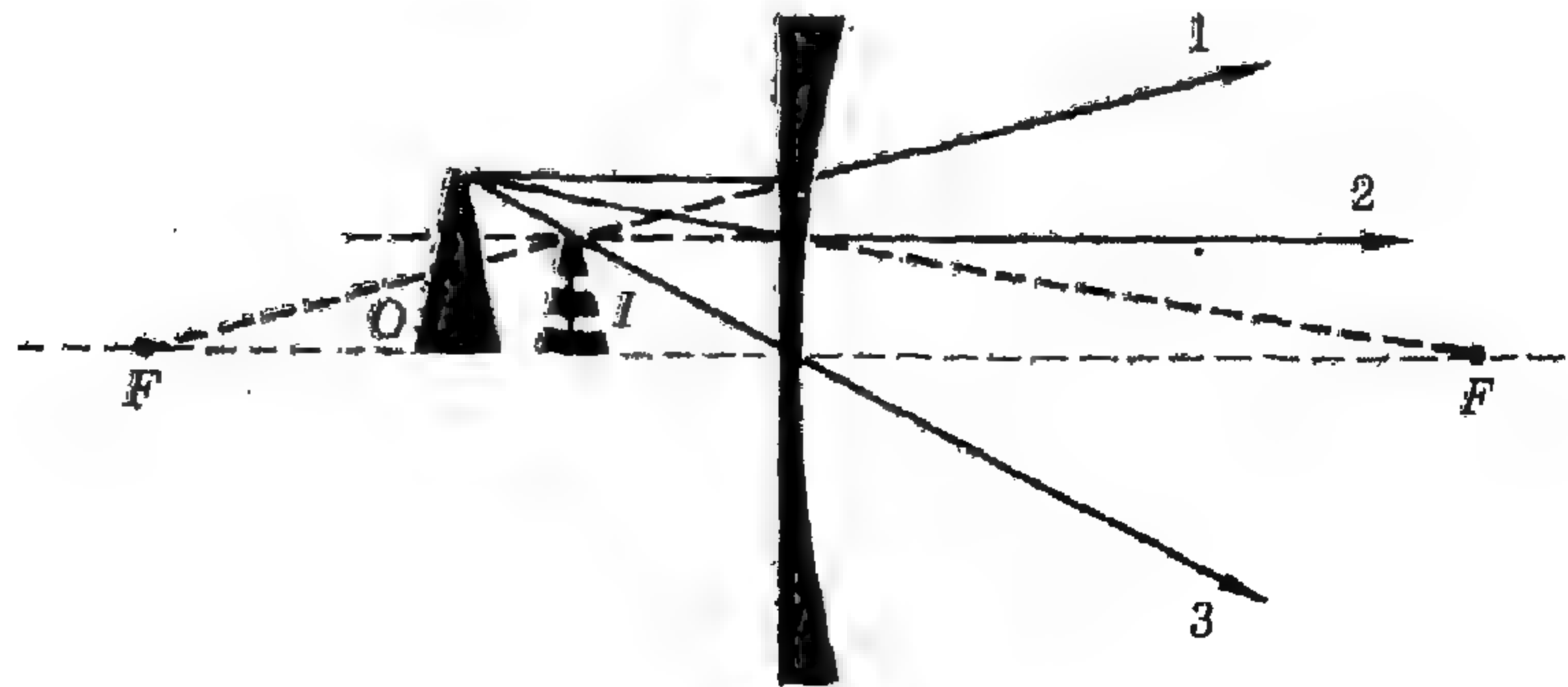
نستطيع الآن أن نرسم ثلاثة من الأشعة الضوئية العديدة التي تمر خلال العدسة ويتيح لنا أي اثنين منها أن نحدد موقع صورة الجسم . يوضح الشكل ٢٣ - ٢٧ مثالين لهذا التكوين . لاحظ أن الصورة في جزء أ حقيقية لأن الأشعة الثلاثة تتجمع فعلا عند الصورة وإذا وضعنا حائلا هناك لتكونت عليه صورة للجسم . أما في الجزء (ب) فالصورة تقديرية ، أو تخيلية لأن الأشعة الثلاثة تبدو فقط كما لو كانت آتية من موضع الصورة وأن حائلا موضوعا في ذلك الموقع لن تظهر عليه أية صورة لأن الأشعة الثلاثة لا تتقابل فعلا عند ذلك المكان .

مثال توضيحي ٢٣ - ٦ : استخدمت عدسة محدبة بعدها البؤري 10.0 cm لتكوين صورة لجسم يبعد 5.0 cm أمامها . ارسم مسار الأشعة لتحديد الصورة . طريقة الحل : يوضح الشكل ٢٣ - ٢٩ المسار الصحيح للأشعة . نلاحظ أن العين ستعتبر أن الأشعة الثلاثة قادمة من الموقع المئين للصورة ، والصورة كما هو مبين تقديرية ، معتدلة ومكبرة .



شكل ٢٣ - ٢٩
تكون صورة تقديرية بواسطة
العدسات المحدبة عندما يقع
الجسم داخل النقطة البؤرية

مثال توضيحي ٢٣ - ٧ : استخدمت عدسة مقعرة بعدها البؤري 10.0 cm لتكوين صورة الجسم موضوع أمام العدسة وعلى بعد 5.0 cm منها اوجد موضع الصورة بواسطة رسم مسار الأشعة . طريقة الحل : يوضح الشكل ٢٣ - ٣٠ رسم مسار الأشعة الصحيح ، حيث تكون الصورة ، أيضا تقديرية وهي معتدلة ومصغرة .



شكل ٢٣ - ٣٠
هل تكون الصورة المتكونة
بواسطة عدسة مقعرة دائما
تقديرية إذا كان الجسم
حقيقي ؟

٢٣ - ١٣ معادلة العدسة الرقيقة

اعتبر الصورة المكونة بواسطة العدسة المجمعة والمبينة في الشكل ٢٣ - ٣١ (أ) و (ب) المثلثان EBD و ABH في الجزء (أ) متشابهان وبهذا يمكن أن نكتب

$$\frac{I}{O} = \frac{i}{p}$$

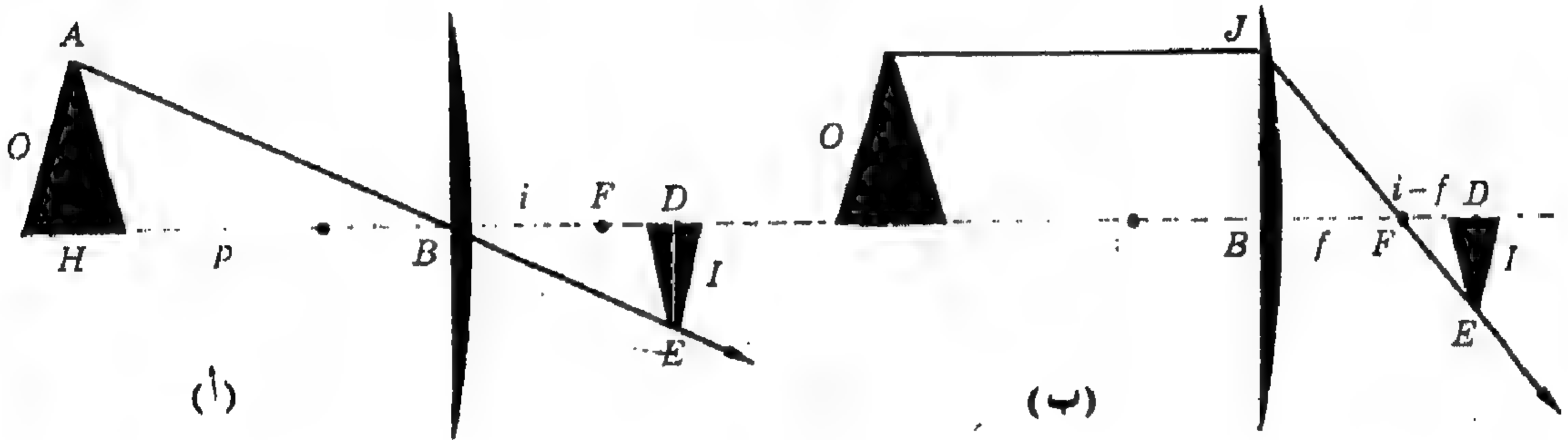
ولدينا أيضا من تشابه المثلثين EDF و JFB في الجزء (ب) ما يلي

$$\frac{I}{O} = \frac{i-f}{f}$$

بمساواة هاتين المعادلتين واجراء بعض التبسيط ينتج أن

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

٥ - ٢٣



هذه المعادلة هي نفسها معادلة المرآة (٢٣ - ٥) وقد حصلنا عليها باعتبار p و i موجبين حين يكون كل من الجسم والصورة في وضعيهما الطبيعيين ، بحيث يكون الجسم في الجهة التي يأتي منها الضوء وتكون الصورة في الجانب الذي يتجه اليه الضوء . وتنطبق المعادلة (٢٣ - ٦) ، والخاصة بالتكبير ، على العدسات أيضا وذلك لأن إحدى المعادلات السابقة متطابقة معها .

شكل ٢٣ - ٣١
المثلثان EBD و ABH
متشابهان تماما كالمثلثين
 JFB ، EDF

يمكننا اشتقاق علاقة صالحة للتطبيق على العدسات المقعرة وذلك بالرجوع الى مجموعات المثلثات المتشابهة المبينة في الشكل ٢٣ - ٣٢ (أ) و (ب) لدينا ،

$$\frac{I}{O} = \frac{f-i}{f} \quad \text{و} \quad \frac{I}{O} = \frac{i}{p}$$

بمساواتهما والتبسيط نجد أن :

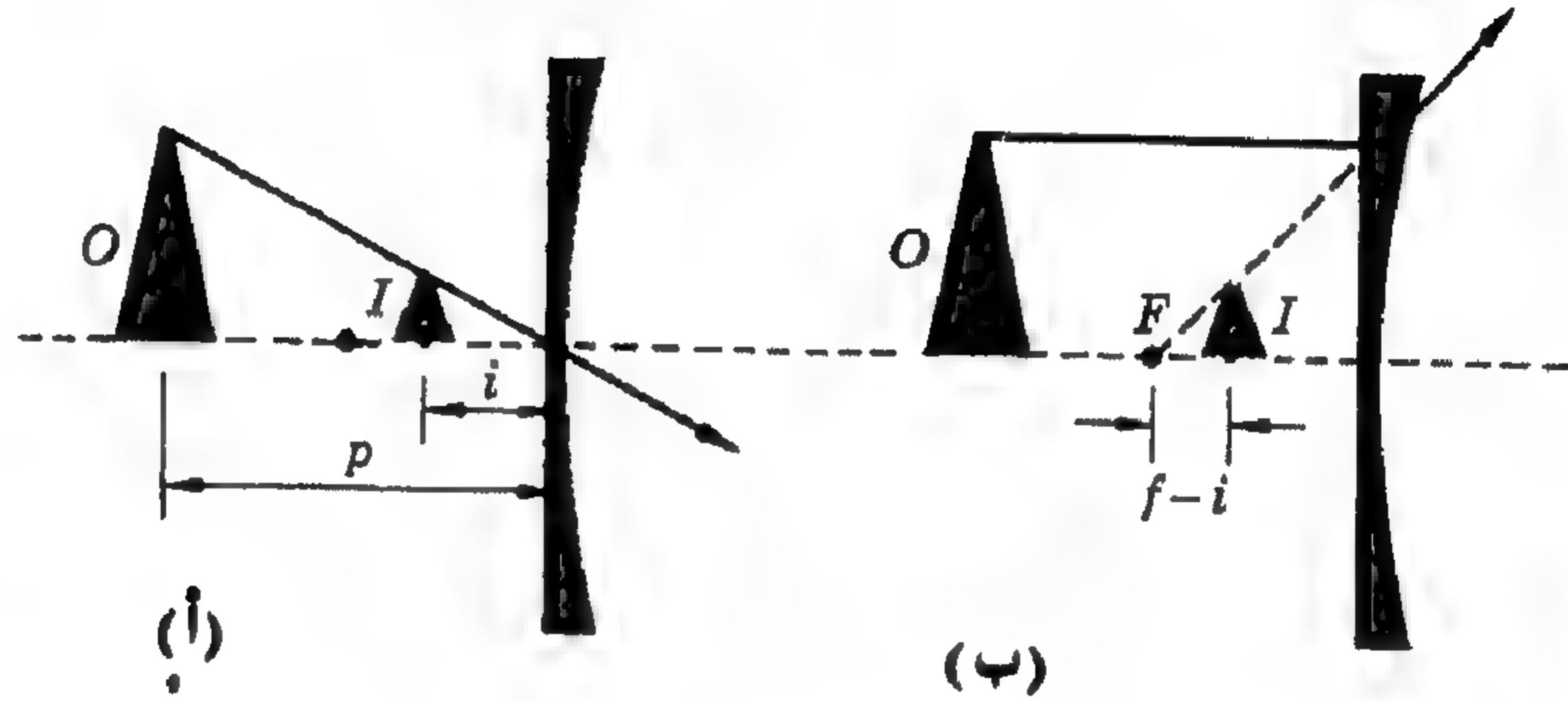
$$\frac{1}{p} - \frac{1}{i} = -\frac{1}{f}$$

ولكى نجعل هذه العلاقة تبدو مثل المعادلة (٢٣ - ٥) علينا أن نأخذ كلا من f و i سالبين فإذا اتفقنا على أن العدسة المقعرة (المفرقة) لها بعد بؤرى سالب لأمكن إلغاء الإشارة السالبة الموضوعة أمام الحد $1/f$ وحذره على ذلك ، لو اتفقا على جعل بعد الصورة سالبا حين تكون الصورة في جانب العدسة الذى يأتى منه الضوء فإن الإشارة السالبة أمام الحد $1/i$ يمكن الغاؤها هى الأخرى . وفي هذه الحالة ستطبق المعادلة (٢٣ - ٥) على جميع العدسات والمرائى .

لاحظ أيضا أن المعادلة (٢٣ - ٦) للتكبير تنطبق على جميع العدسات والمرائى . لنقم الآن بمراجعة موجزة لقاعدة الإشارات المتبعة عند استخدام المعادلة

(٢٣ - ٥) معادلة العدسة وقاعدة الإشارات الخاصة بها

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$



شكل ٢٣ - ٢٢
دراسة المثلثات المتشابهة
تؤدي الى معادلة العدسة

- ١ - يكون بعد الجسم دائما موجبا اذا كان الجسم في جانب العدسة أو المرآة الذى يأتى منه الضوء .
- ٢ - يكون بعد الصورة موجبا
أ - في حالة المرئى إذا كانت الصورة على جانب المرآة الذى يوجد به الضوء ، أى أمام المرآة .
ب - في حالة العدسات إذا كانت الصورة على جانب العدسة الذى يتجه اليه الضوء النافذ من العدسة .
- ٣ - يكون البعد البؤرى للمرئى والعدسات المجمعة موجبا ، بينما يكون سالبا للمرئى المحدبة والعدسات المفرقة .

لاحظ أن الوضع الطبيعى أو العادى للجسم والصورة يكون موجبا ، فمن الطبيعى أن يوجد الجسم في الجانب الذى يأتى منه الضوء أما من ناحية الصورة المتكونة بواسطة عدسة فهى طبيعية عندما تكون في الجانب الذى يذهب اليه

الضوء . من ناحية أخرى ، تعتبر الصورة في حالة المرايا طبيعية حين تكون على نفس جانب الجسم لأن الضوء في هذه الحالة ينعكس ولا ينفذ من الطبيعي أن تبدو العدسات والمرايا المجمعة أكثر طبيعية بالنسبة لنا عن المرايا والعدسات المفرقة . ومن ثم فالأشياء الطبيعية ستكون لها إشارة موجبة والأخرى سالبة .

وقبل أن نبرح هذا القسم علينا أن نشير الى أن هناك عدة قواعد مختلفة للإشارات وهي تستخدم أحيانا . ، فالإشارات السالبة كثيراً ما تستخدم في معادلات العدسات والمرايا . ويبدو أنه لا يوجد اتفاق عام على أى النظم أفضل . فإذا استخدمت معادلة غير التى ذكرت في هذا القسم فيجب الإلتزام بقواعد الإشارات الخاصة بها ولذا فسنستعمل دائماً المعادلة (٢٣ - ٥) والقواعد التى نصصنا عليها بطبيعة الحال .

مثال توضيحي ٢٣ - ٨ : عدسة مفرقة بعدها البؤرى 20 cm تكون صورة لجسم ارتفاعه 3 cm موضوع على بعد 40 cm من العدسة . اوجد وضع وحجم الصورة .
طريقة الحل : من المعادلة (٢٣ - ٥) نجد باستخدام كل الأطوال بالسنتيمترات أن

$$i = -\frac{40}{3} \text{ cm} \quad \text{أو} \quad \frac{1}{40} + \frac{1}{i} = -\frac{1}{20}$$

الصورة تتكون في الجانب « الخطأ » للعدسة ، أى على نفس الجانب الذى يأتي الضوء منه فهى بالطبع تخيلية كما يمكن التأكد باستعمال رسم مسار الأشعة . لإيجاد حجم الصورة نستخدم المعادلة (٢٣ - ٦) ،

$$I = \frac{(3)(\frac{40}{3})}{40} = 1 \text{ cm} \quad \text{أو} \quad \frac{I}{O} = \frac{i}{p}$$

لاحظ أننا لا نتعامل مع الإشارات حين نريد إيجاد حجم الصورة .

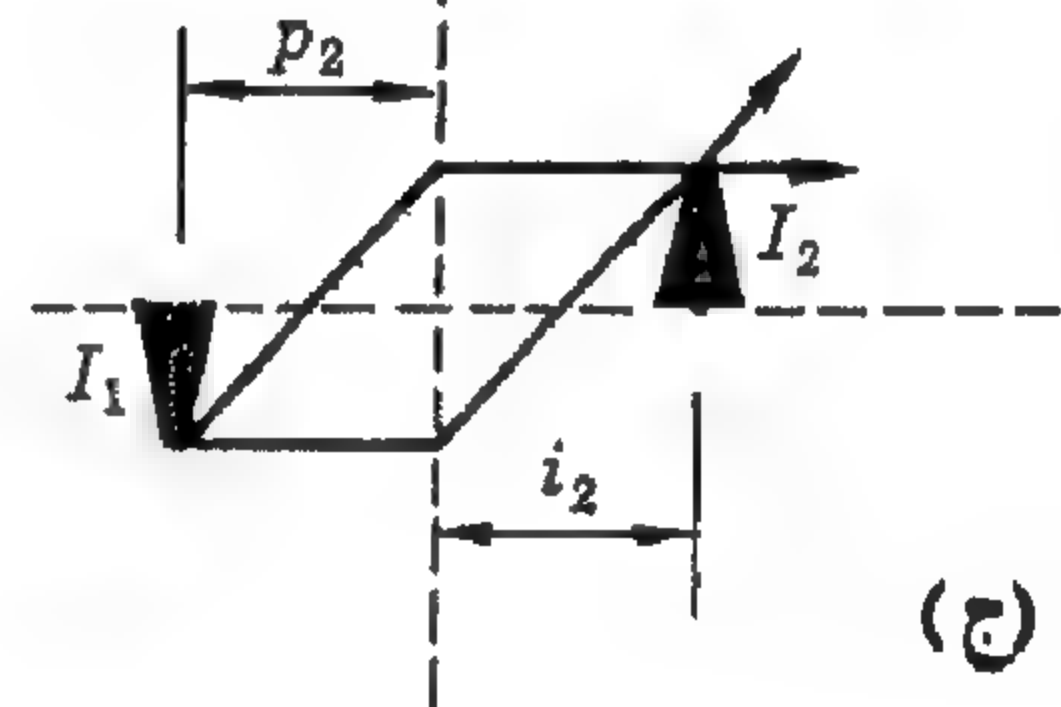
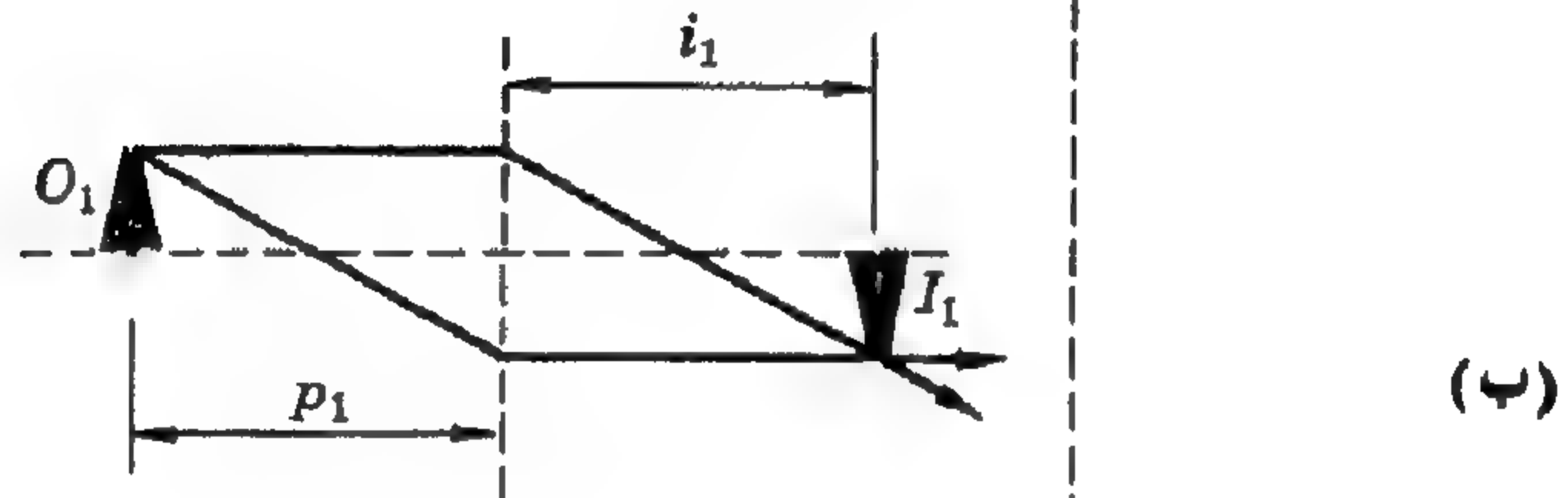
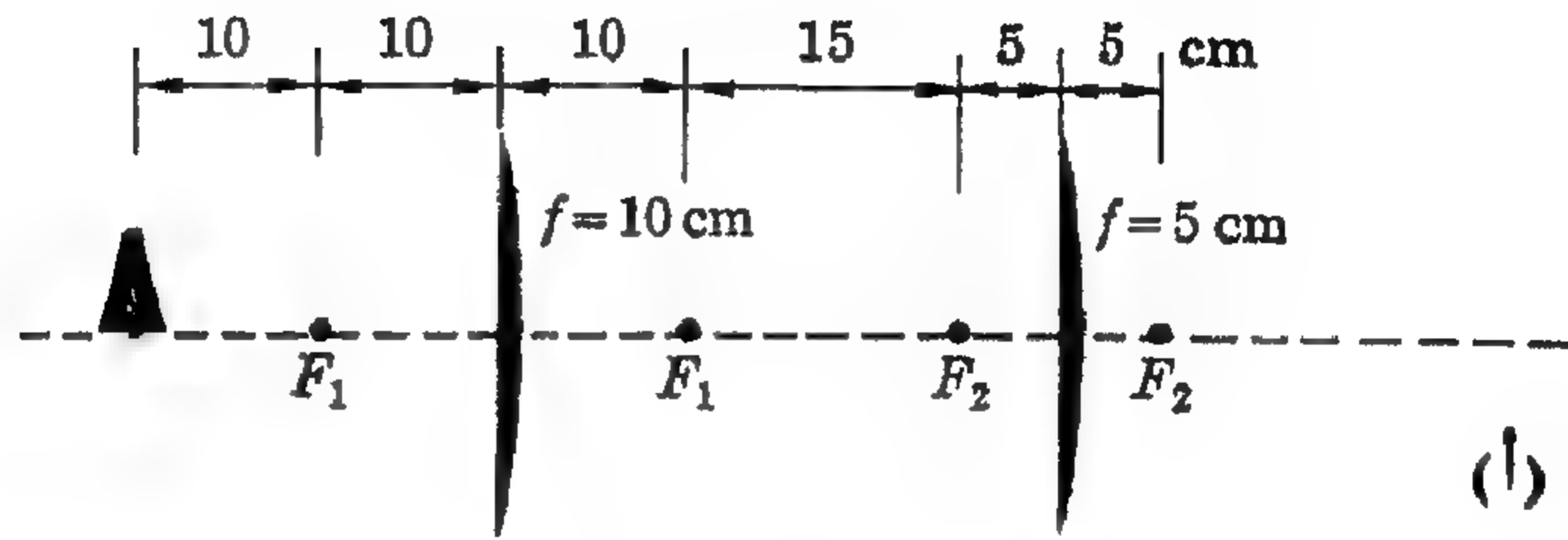
٢٣ - ١٤ مجموعات من العدسات

تحتوى معظم الأجهزة الضوئية على أكثر من عدسة واحدة ، ويسهل تناول هذه الأنظمة اذا خطونا بطريقة منظمة . لنعتبر الآن الصورة النهائية المتكونة بواسطة العدستين والمبينة في الشكل ٢٣ - ٢٣ . يبعد الجسم 20 cm عن العدسة الأولى التى تبعد بدورها 30 cm عن العدسة الثانية وكلتا العدستان مجمعة . لحل هذه المسألة يرسم مسار الأشعة وكذا بالمعادلات فإننا نبدأ كما في الشكل ٢٣ - ٢٣ (ب) و (ج) .

أولاً ، تجاهل العدسة الثانية ووجد صورة الجسم الأصلية كما تكونها العدسة الأولى ، يحدد رسم مسار الأشعة الصورة I_1 في الجزء (ب) من الشكل . ويمكننا باستخدام المعادلة أن نجد

$$i_1 = 20 \text{ cm} \quad \text{أو} \quad \frac{1}{20} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{10}$$

حيث i_1 كما هو موضح بالشكل .



شكل ٢٢ - ٢٣
لإيجاد الصورة المتكونة
بواسطة مجموعة من العدسات
فإننا نعتبر كل عدسة على
حده كما في (ب) و (ج)

ثم نستخدم الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى كجسم للعدسة الثانية وهذا ممكن لأن العين أو أى جهاز ضوئى موضوع الى يمين الصورة سيرى الصورة كما لو كانت حقا جسما في ذلك الموضع . والآن بتجاهل العدسة الأولى تماما واستعمال I_1 كجسم للعدسة الثانية فإننا نرسم مسار الأشعة كما في الشكل ٢٢ - ٢٣ ح . وتقع الصورة النهائية عند I_2 أو بالمعادلة :

$$\frac{1}{30 - 20} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{5} \quad \text{و} \quad \frac{1}{p_2} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2}$$

أو

$$i_2 = 10 \text{ cm}$$

حيث i_2 هو كما بالشكل . من الواضح أن الصورة النهائية المتكونة بواسطة العدستين مجتمعتين I_2 ستكون حقيقة ومعتدلة .

لإيجاد حجم الصورة النهائية بدلالة O_1 وارتفاع الجسم ، نطبق المعادلة (٢٣ - ٦) مرتين . فللموقف المبين في ٢٣ - ٣٣ ب لدينا ،

$$I_1 = O_1 \quad \text{أو} \quad \frac{I_1}{O_1} = \frac{20}{20}$$

والآن باستخدام الشكل ٢٣ - ٣٣ ح ، وتذكر أن ارتفاع I_1 هو نفسه ارتفاع O_1 وأن I_1 هو في الواقع الجسم بالنسبة للعدسة الثانية فان ،

$$I_2 = (O_1)\left(\frac{10}{10}\right) = O_1 \quad \text{أو} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{i_2}{p_2}$$

ومن ثم نجد الموقف غير العادى الذى فيه الصورة بنفس الحجم مثل الجسم الأصيل .

ملخص

يتكون الضوء من أمواج كهرومغناطيسية (ك م) فى المدى المرئى من الأطوال الموجية ، 4×10^{-7} الى 7×10^{-7} cm سرعة الضوء فى الفراغ هي $c = 2.998 \times 10^8$ m/s ويتنقل بسرعة أقل من هذه فى الأوساط الأخرى . وتميز المواد ضوئيا بمعامل انكسارها (n) وهو عبارة عن النسبة بين سرعة الضوء فى الفراغ وسرعته فى المادة . بالنسبة للهواء $n = 1.0003$ وللماء $n = 1.33$

عندما ينعكس الضوء من على سطح أملس فإن زاوية السقوط تساوى زاوية الانعكاس أما حين يمر الضوء من مادة (معامل انكسارها n_1) الى أخرى (معاملها n_2) فإنه ينكسر حسب قانون سنل : $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ إذا كانت $n_2 > n_1$ فإن الشعاع ينحني نحو العمود ، أما عند ما تكون $n_2 < n_1$ فإن θ_1 تكون أصغر من θ_2 وهذا يؤدي إلى انعكاس كلي داخلى عندما $\theta_2 = 90^\circ$ وتعطى الزاوية الحرجة للانعكاس الكلي الداخلى بالعلاقة $\sin \theta_c = n_2/n_1$

الصور الحقيقية هي المواقع التى تتركز فيها الأشعة لتكون نسخا ضوئية لجسم ما ويمكن عرض هذه الصور عند وضع حائل فى موقع الصورة . أما الصور التقديرية (أو التخيلية) فهى المواقع التى يبدو فقط أن الضوء قادم منها ، وعند وضع حائل فى ذلك الوقع لا تتكون عليه أية صورة .

تكون المرايا المستوية صورا تقديرية للأجسام الموضوعة أمامها وتكون الصورة خلف المرآة على مسافة تساوى بعد الجسم عن المرآة وتكون الصورة تقديرية ، معتدلة ولها نفس حجم الجسم .

تتجمع الأشعة المتوازية فى النقطة البؤرية بواسطة عدسة أو مرآة مجمعة . وتبدو الأشعة المتوازية متفرقة من النقطة البؤرية حين تنعكس بواسطة مرآة محدبة أو حين تمر خلال عدسة مفرقة . يرتبط بعد الجسم p مع بعد الصورة i والبعد البؤرى f بالعلاقة $1/p + 1/i = 1/f$ وقد عرضت قواعد الإشارات المستخدمة مع هذه العلاقة فى القسم ٢٣ - ١٣ . كما أن نسبة طول الصورة الى طول الجسم (التكبير) قد أعطيت بالعلاقة i/p

يمكن إيجاد صور المرايا والعدسات بالرسم البياني بواسطة تتبع ثلاثة أشعة ، كما وصفت في الأقسام ٢٣ - ٨ و ٢٣ - ١٠ للمرايا و ٢٣ - ١٢ للعدسات .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

- ١ - أن تعطى الحدود التقريبية للأطوال الموجية للطيف المرئي وأن ترتب قائمة بالألوان حسب أطوالها الموجية .
- ٢ - أن تذكر سرعة الضوء في الفراغ . أن تحسب n لمادة ما عندما تعطى سرعة الضوء فيها أو العكس .
- ٣ - أن تشرح لماذا يعطى الجسم البعيد أشعة متوازية وأن تميز بين صدر الموجة والشعاع ، وأن تعطى العلاقة بين كل منهما والآخر .
- ٤ - أن ترسم الشعاع المنعكس عندما تعطى الشعاع الساقط على سطح أملس .
- ٥ - أن تشرح معنى الانكسار وأن تستطيع استعمال قانون سنل للشعاع المنكسر .
- ٦ - أن توضح باستعمال الرسم البياني كيف يحدث الانعكاس الكلي الداخلي حيث تكون $n_2 < n_1$ فقط وأن تستخدم قانون سنل لتجد الزاوية الحرجة للانعكاس الكلي الداخلي . أن تضع قائمة باستخدامات هذه الظاهرة .
- ٧ - أن تذكر ما إذا كانت صورة معينة تقديرية أو حقيقية
- ٨ - أن تستخدم رسم مسار الشعاع لكي تحدد موقع الصور لكل من العدسة المنفردة والمرآة المنفردة .
- ٩ - أن تستخدم معادلة العدسة والمرآة لكي تحصل على P ، أو d_i و f إذا أعطيت اثنين من الثلاثة أو أعطيت وصفهما . أن تجد العلاقة بين f و R لمرآة ما . أن تذكر إشارة f في أية حالة .
- ١٠ - أن تجد حجم صورة ما إذا أعطيت حجم الجسم أو العكس .
- ١١ - أن تذكر ما إذا كانت عدسة ما مفرقة أم مجمعة في الهواء حين تعلم شكلها .
- ١٢ - أن تشرح كيف يمكن عمليا تعيين النقطة البؤرية والبعد البؤري لمرآة مقعرة وعدسة محدبة .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف وشرح كل من :

الطيف المرئي

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

معامل الانكسار

صدر الموجة ، الشعاع ، الضوء المتوازي

زاوية السقوط = زاوية الانعكاس

الانكسار ، قانون سنل

لا يحرف اللوح المتوازي شعاع الضوء

الانعكاس الكلي الداخلي ، الزاوية الحرجة

الصور التقديرية مقابل الصور الحقيقية

النقطة البؤرية ، البعد البؤري $f = R/2$

ثلاثة أشعة من أجل تحديد موقع الصورة

معادلة العدسة والمرآة ، قاعدة الاشارات

محدبة ، مقعرة ، مفرقة ، مجمعة

أسئلة وتمارين

- ١ - اعتبر مرآة مقعرة وجسما بعيدا في المالا نهاية . أين ستكون الصورة ؟ وهل هي معتدلة أم مقلوبة ، وهل هي أصغر أم أكبر من الجسم ؟ أجب عن هذه الأسئلة حينما يأخذ الجسم في الإقتراب ببطء نحو المرآة وسجل على وجه الخصوص تلك المواضع التي تتغير عندها إحدى الأجابات .
 - ٢ - كرر السؤال الأول لمرآة محدبة .
 - ٣ - كرر السؤال الأول لعدسة مجمعة .
 - ٤ - كرر السؤال الأول لعدسة مفرقة .
 - ٥ - يسمى انعكاس الضوء من على مرآة ملساء انعكاسا مرآويا . (وذلك لأن كلمة specular مشتقة من الأصل اللاتيني لكلمة مرآة)
وحينما يحدث الانعكاس من على سطح خشن فإنه يسمى انعكاسا انتشاريا . صف طبيعة هذا النوع الأخير من الانعكاس مستخدما الرسم للتوضيح .
 - ٦ - لا يبدو الجسم المغمور في الماء على نفس العمق تحت السطح كما هو في الواقع حينما ينظر اليه الإنسان من أعلى الماء . اشرح السبب .
 - ٧ - اشرح باستخدام رسم صدر الموجة لماذا تكون العدسة إما مجمعة أو مفرقة اعتمادا على المادة المحيطة بها .
 - ٨ - هل يمكن لكوب زجاجي فارغ أن يركز حزمة ضوئية ، وهل يمكن ذلك في حالة كوب مليء بالماء ؟
هل يمكن أن ينشأ حريق عن طريق الصدفة نتيجة لوضع إناء زجاجي به ماء في نافذة مشمسة ؟
 - ٩ - تعمل فقاعة هوائية كروية داخل قطعة من الزجاج عمل عدسة صغيرة ، اشرح وهل هي مجمعة أو مفرقة .
 - ١٠ - كيف يمكن تعيين البعد البؤري لعدسة مجمعة ؟ ولعدسة مفرقة ؟
 - ١١ - كرر السؤال (١٠) للمرايا .
 - ١٢ - وضعت مرآتان مستويتان بحيث كوئنا زاوية قائمة ، ثم وضع جسم بينهما . كم عدد الصور المتكونة ؟ كرر المسألة اذا كانت الزاوية بينهما 30°
 - ١٣ - بكم يزيد زمن استغراق نبضة من الضوء تنتقل من القمر لتصل الأرض بسبب وجود الهواء عما إذا كان الفراغ يغلف الأرض ؟ (ق)
 - ١٤ - يمكن تركيب « فرن شمسي » باستخدام مرآة مقعرة تركز أشعة الشمس في منطقة صغيرة وهي منطقة الفرن كيف تتوقع لدرجة الحرارة في الفرن أن تتغير بتغير مساحة المرآة والبعد البؤري للمرآة (ق)
 - ١٥ - اعتقد نيوتن أن الضوء يتكون من فيض من الجسيمات وأن « جسيمات الضوء » تنجذب بشدة بواسطة سطح الماء عندما ينفذ الضوء من الهواء الى الماء . كيف يمكن أن يؤدي هذا الى تأثير الانكسار الملاحظ ؟ ولماذا تنفي سرعة الضوء الملاحظة هذه الفكرة ؟
 - ١٦ - في كثير من متاحف العلوم (وأيضاً في بعض الأماكن غير المتوقعة) توجد غرفة مصممة بحيث أن شخصا يمكنه أن يهنس عند أحد أركانها فيسمع بوضوح في نقطة معينة بعيدا عنه . كيف يتم تركيب هذه الغرفة حتى يحدث هذا التأثير ؟ (يمكن تركيز أمواج الصوت في بؤرة تماما مثل أمواج الضوء بالانعكاس) .
- ### مسائل
- ١ - تلبس فتاة قرطا في أذنها اليسرى ، وعندما تنظر في المرآة المستوية الى نفسها فإنها ترى قرطا في أذن صورتها . هل القرط في الأذن اليمنى أم اليسرى للصورة ؟
 - ٢ - افترض أن طول D في الشكل ٢٣ - ٣ كان 10 cm ماهما أقل سرعتين ممكنتين لدوران القرص المئين بحيث ينعكس الشعاع بشكل صحيح ؟
 - ٣ - يبلغ معامل انكسار نوبج شفاف من البلاستيك 1.48 ما هي سرعة الضوء في هذا البلاستيك ؟
 - ٤ - يستخدم شعاع الرادار في تحديد موقع طائرة ما . يبلغ الزمن اللازم لنبضة الرادار لكي تنتقل من جهاز الإرسال الى الطائرة والعودة مرة أخرى الى جهاز الإرسال $5.0 \times 10^{-4}\text{ s}$ كم تبعد الطائرة ؟
 - ٥ - يلزم لنبضة رادار تنعكس من على سطح القمر 2.6 s لكي تقوم برحلة من الأرض الى القمر والعودة مرة أخرى الى الأرض . ما هو بعد القمر ؟

- ٦ - ما هي المسافة التي يقطعها شعاع ضوئي داخل الماء إذا استغرق زمنا يساوي الزمن الذي يستغرقه أن يقطع 1 cm في الهواء ؟
- ٧ - يدخل الضوء بزاوية سقوط 37° الى لوح مسطح من الزجاج ($n = 1.50$) (أ) ما هي زاوية الانكسار داخل الزجاج ؟ (ب) ما هي الزاوية بين الشعاع الذي يخرج من اللوح والشعاع الساقط على اللوح ؟
- ٨ - يختلف معامل انكسار الزجاج باختلاف الطول الموجي للضوء . يبلغ معامل انكسار الزجاج الناجي 1.65 للضوء الأزرق ($\lambda = 4300 \text{ \AA}$) ويبلغ 1.615 للضوء الأحمر ($\lambda = 6800 \text{ \AA}$) سقط شعاع ضوئي مكون من هذين اللونين على زجاج ناجي بزاوية سقوط تبلغ 50° اوجد الزوايا الواقعة بين هذين اللونين في الزجاج .
- ٩ - يسقط شعاع ضوئي بزاوية قدرها 53° على طبقة من الماء تطفو على طبقة من ثاني كبريتيد الكبريت اوجد الزاوية التي يصنعها الشعاع في كل سائل .
- ١٠ - ما هي الزاوية التي يجب أن تنظر بها سمكة من داخل الماء نحو حشرة تقف على الشط عند حافة الماء ؟ اعتبر أن السمكة تقف تحت سطح ببحر ساكنة .
- ١١ - لو أن شعاعا ضوئيا ينتقل داخل مكعب صلب في مستوى يوزاى قاعدته ، فإنه سبطل في الانتقال - داخل المكعب الى الابد بشرط أنه يصطدم بكل سطح بزاوية سقوط قدرها 45° كم يجب أن يكون معامل انكسار المكعب لو ريد للشعاع أن ينعكس كلياً داخلها عند كل سطح ؟ (ب) ما هي العقيات العلمية التي قد تظهر في مثل هذه الحالة ؟
- ١٢ - مرآة مقعرة نصف انحنائها 10 cm تقوم بتكوين صورة لجسم ارتفاعه 2 cm موضوع أمامها وعلى بعد 20 cm منها . اوجد (أ) موضع و (ب) حجم الصورة (ج) وهل هي حقيقة أم تقديرية ؟ (د) وهل هي معتدلة أم مقلوبة ؟ أعد الحسابات لأجسام على بعد (هـ) 10 (و) 8 و (ز) 4 cm (تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة) .
- ١٣ - أوجد (أ) موضع ، (ب) حجم ، و (ج) طبيعة الصورة المتكونة لجسم ارتفاعه 3 cm موضوع على بعد 50 cm امام مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 20 cm . أعد حسابك عندما يكون الجسم على بعد (د) 20 و (هـ) 5 cm (تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة) .
- ١٤ - إذا وضع جسم على بعد 40 cm أمام مرآة محدبة بعدها البؤرى 10 cm (أ) فأي نوع تكون الصورة ؟ (ب) كم يبلغ التكبير ، (ج) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ (تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة) .
- *١٥ - تستخدم مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 200 cm لتكوين صورة حقيقية لجسم ما . (أ) أين يجب أن يوضع الجسم حتى يكون بعد الجسم مساوي لبعد الصورة ؟ (ب) هل تكون الصورة متراكبة على الجسم ؟ (ج) قارن بين حجمي الصورة والجسم (تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة) .
- *١٦ - (أ) أين يجب وضع الجسم إذا كانت الصورة المتكونة بواسطة مرآة محدبة تبعد عن المرآة نصف المسافة التي يبعدها الجسم ؟ (ب) كم يبلغ التكبير في هذه الحالة ؟
- *١٧ - أعطيت مرآة مقعرة بعدها البؤرى 20 cm (أ) أين يجب وضع جسم ما بحيث تكون الصورة حقيقية ويبلغ حجمها ضعف حجم الجسم ؟ (ب) أعد الحسابات إذا كانت الصورة تقديرية .
- *١٨ - تكونت صورة تقديرية بواسطة مرآة محدبة بعدها البؤرى 10 cm (أ) أين يجب وضع الجسم إذا كانت الصورة تبلغ نصف حجم الجسم ؟ (ب) هل يمكن - لمثل هذا النوع من الأجسام - الحصول على صورة تقديرية أكبر من الجسم ؟
- ١٩ - استخدمت عدسة محدبة بعدها البؤرى 20 cm لتكوين صورة لجسم ارتفاعه 3 cm أوجد موضع ، حجم وطبيعة الصورة عند الأبعاد التالية للجسم :
- (أ) 100 cm ، (ب) 40 cm ، (ج) 10 cm
- ٢٠ - اوجد موضع وحجم وطبيعة الصورة المتكونة بواسطة عدسة مفرقة بعدها البؤرى 30 cm - إذا وضع جسم ارتفاعه 5 cm على الأبعاد التالية (أ) 90 cm (ب) 60 cm ، (ج) 20 cm
- *٢١ - (أ) أين يجب وضع جسم بالنسبة لعدسة مجمعة إذا كانت الصورة لها نفس الحجم مثل الجسم ؟ (ب) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ عبر عن اجابك ببلاية /

- ٢٢* - إذا استخدمت عدسة مفرقة لتكوين صورة يبلغ حجمها نصف حجم الجسم فأين يجب وضع الجسم ؟
- ٢٣* - عدستان مجمعتان منطبقتان $f = 30 \text{ cm}$ والمسافة بينهما 90 cm (أ) اوجد البعد النهائي لصورة جسم موضوع على مسافة 120 cm أمام العدسة الأولى . (ب) كم يبلغ تكبير المجموعة ؟
- ٢٤* - وضع جسم على بعد 12 cm أمام عدسة مجمعة ($f = 8 \text{ cm}$) . هناك عدسة مفرقة -6 cm على مسافة 36 cm بعد العدسة الأولى . (أ) اوجد موضع وتكبير الصورة النهائية . (ب) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ (ج) وهي هي معتدلة أم مقلوبة ؟
- ٢٥* - عدستان الأولى مجمعة وبعدها البؤرى 20 cm والأخرى مفرقة -30 cm $f =$ بفصل بينهما مسافة 30 cm . إذا وضع جسم على بعد 10 cm أمام العدسة الأولى فأوجد (أ) موضع الصورة (ب) التكبير .
- ٢٦* - وضع جسم على بعد 40 cm أمام عدسة مجمعة $f = 20 \text{ cm}$ وهي بدورها موضوعة أمام مرآة مستوية وعلى بعد 50 cm أوجد جميع الصور المتكونة بواسطة هذه المجموعة .
- ٢٧* - وضعت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 8 cm على بعد 16 cm الى يسار مرآة كروية مقعرة نصف قطرها 20 cm . اذا وضع جسم ما على بعد 8 cm الى يسار العدسة ، فاوجد كل الصور المتكونة بواسطة هذه المجموعة .
- ٢٨ - عدسة من الزجاج التاجى بعدها البؤرى 20 cm موضوعة في الهواء . كم يبلغ بعدها البؤرى حين تغمر في الماء ؟ .

الفصل الرابع والعشرون

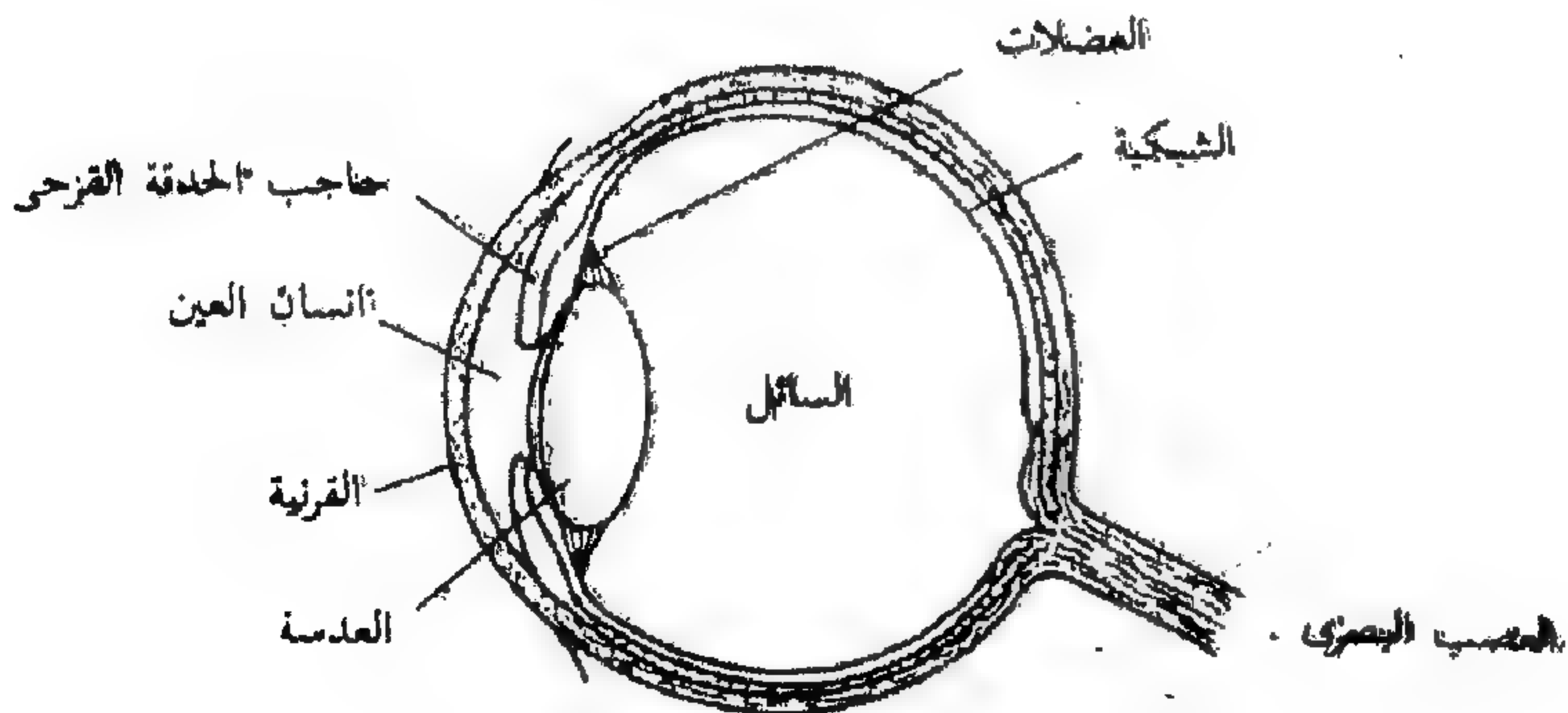
النبائط الضوئية

الآن وقد فهمنا العدسات والمرايا فإننا نستطيع دراسة بعض النبائط الضوئية الشائعة . وسنناقش عمل فئة شائعة من النبائط مثل العين البشرية والتلسكوب (المقراب) وكذلك الميكروسكوب (المجهر) وأجهزة أخرى ذات أهمية في حياتنا . وهذه الطريقة لن نحصل فقط على تدريب على استخدام العدسات والمرايا بل إننا سنصبح أيضا فنيين مهرة في تشغيل تلك النبائط الضوئية التي كثيرا ما تدعو الحاجة الى استخدامها .

أن أكثر النببطات الضوئية شيوعاً ، وهي العين ، هي في الوقت نفسه أكثرها تعقيداً ، فعلى الرغم من أن نظام العدسات الفعلى فيها ليس معقداً جداً إلا أن جهاز الإستيعاب المصاحب لها معقد تعقيد الإنسان نفسه ، ولأزالت الطريقة الدقيقة التى يتم بها نقل الصورة المتكونة على الشبكية فى العين الى احساسنا بالرؤية - تشكل تحدياً لعلماء الفيزياء الحيوية . وسيكون من الضرورى بالنسبة لنا أن نقصر مناقشاتنا على نظام العدسات وتكوين الصورة على شبكية العين .

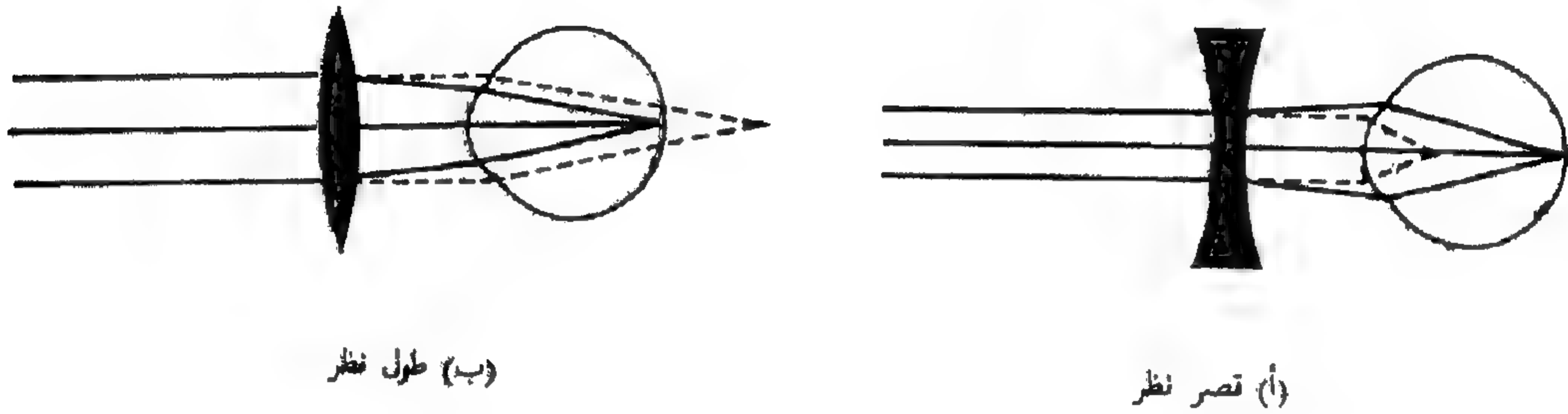
يوضح الشكل ٢٤ - ١ رسماً مبسطاً للعين - ولعلك تعرف فعلاً أن القرنية هي غطاء واق للعين ، وأن حاحب الحدقة القرحى يتحكم فى كمية الضوء الداخلة . أما الشبكية فهي السطح الحساس الذى ينقل الصورة المتكونة عليه الى المخ . عندما يدخل شعاع ضوئى الى العين فإنه ينكسر عند القرنية . ويحدث انكسار أقل فى إنسان العين والعدسة وذلك لأن معاملات انكسار القرنية ، وإنسان العين والعدسة وكذا الأجزاء السائلة من العين كلها متساوية .

تكون كل هذه التأثيرات الانكسارية صورة الأجسام البعيدة على شبكية العين المسترخية العادية ، ومن ثم فالبعد البؤرى للعين هو تقريباً المسافة بين الشبكية والعدسة . فإذا رسمنا مسار الأشعة لعدسة محدبة فسنجد أن بعد الصورة يزيد كلما اقترب الجسم من العدسة . أما فى العين فإن بعد الصورة يجب أن يظل دائماً بحيث تكون الصورة عند الشبكية . ويتحقق هذا فقط اذا ما صارت عدسة العين أكثر تجمعاً كلما اقترب الجسم المرئى من العين . تقوم عضلات العين بتغيير شكل عدسة العين القابلة للتشكيل بحيث تجعل سمكها أكبر (تجمع أكثر) عند رؤية أجسام قريبة من العين .



من الطبيعي أن يستطيع الإنسان إرخاء عدسة العين الى الحالة التي يمكن معها تركيز صورة جسم بعيد في بؤرة على الشبكية فإن لم يستطع يقال أنه يشكو من - قصر النظر - تستطيع العين قصيرة النظر أن تركز الصورة في بؤرة فقط عندما يكون الجسم على مسافة أقل من قيمة معينة وتسمى هذه المسافة النقطة البعيدة للعين. ولما كانت العين تظل مجمعة أكثر من اللازم بحيث لا تسمح بالتركيز الصحيح لكل جسم بعيد ، لذا يجب أن يلبس قصر النظر نظارة ذات عدسات مفرقة حتى يرى الأجسام البعيدة بوضوح . وقد صورنا هذا الموقف في الشكل ٢٤ - ٢ أ حيث تشير الخطوط المتقطعة الى الموضع الذي تتركز فيه صور الأجسام البعيدة بدون استخدام النظارة .

شكل ٢٤ - ٢
تستخدم عدسة مفرقة
لتصحيح قصر النظر
تستخدم عدسة مجمعة
لتصحيح طول النظر
والأشكال هنا مبالغ فيها

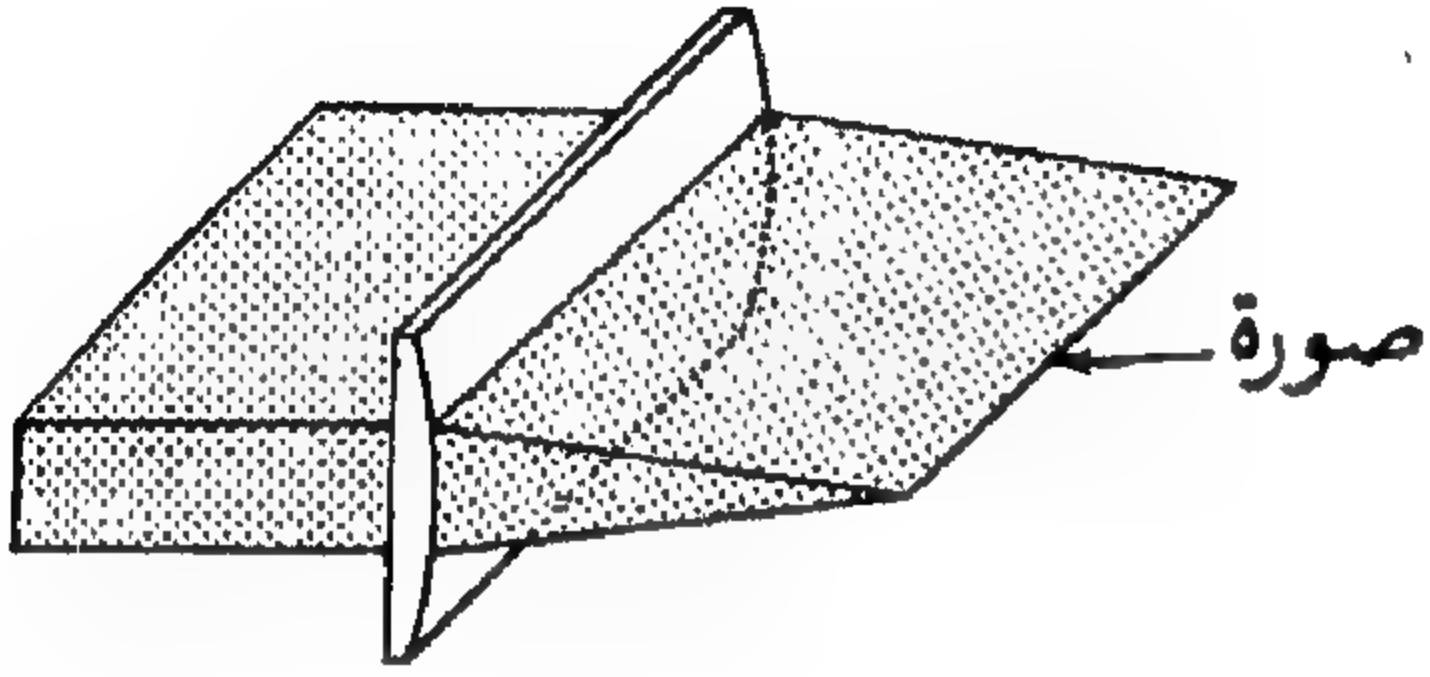


أما الأشخاص الذين لديهم طول نظر فيستطيعون إرخاء أعينهم لترى الاجسام البعيدة ولكنهم لا يستطيعون جعل أعينهم شديدة بدرجة كافية حتى تركز صور الأجسام القريبة على الشبكية . والإنسان الطبيعي لا يستطيع جعل العدسة مجمعة بدرجة كافية حتى ترى أجساما أقرب من حوالي 25 cm وهي المسافة التي تسمى النقطة القريبة العادية للعين . يجب على طويل النظر أن يرتدى نظارة ذات عدسات مجمعة تساعد العين على جعل الأجسام تتركز صورها على الشبكية . وقد صور هذا الموقف في الشكل ٢٤ - ٢ ب .

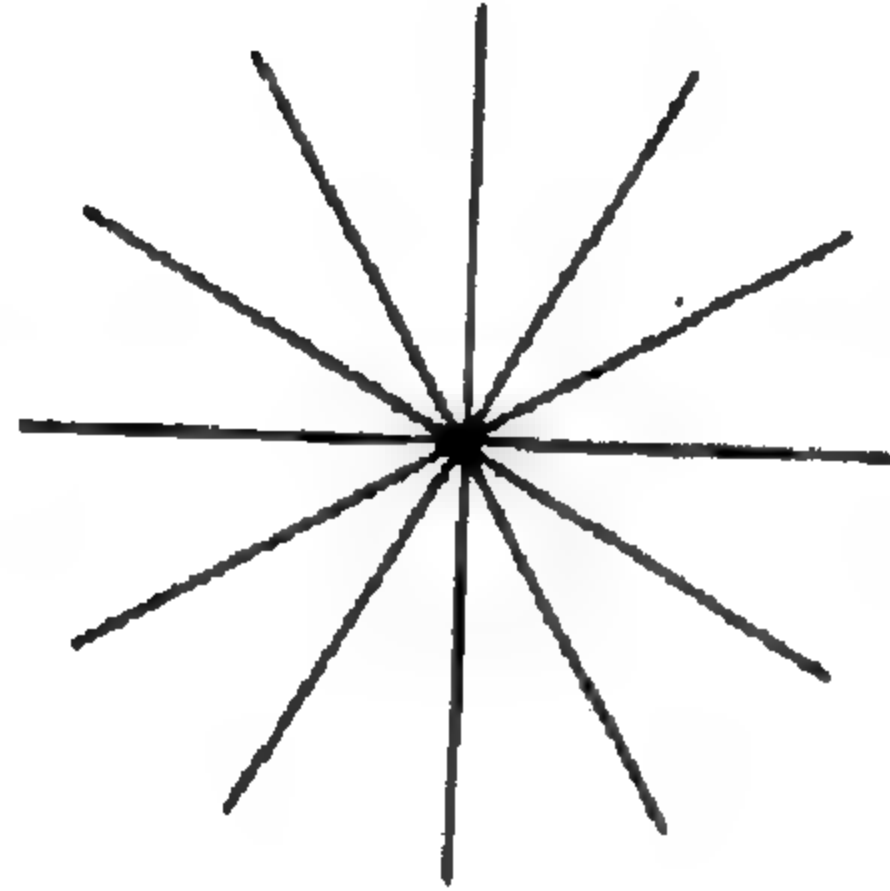
لو كان للعين قابلية ضئيلة لتغيير شكل العدسة ، يقال أن هذه العين قد فقدت التكيف. وقد لا تستطيع مثل هذه العين أن تركز على الجسم البعيد جدا ولا على الجسم القريب جدا . ويتيح استخدام العدسات ثنائية البؤرة في النظارات أن ينظر الشخص خلال العدسة المفرقة حين ينظر الى الأمام وأن ينظر خلال المجمعة حين ينظر الى أسفل . وقد يكون لدى بعض الناس ثلاثة أنواع من العدسات مثبتة في نظارة واحدة .

اللاستجماتية

وأحد أنماط العيوب الشائعة للعين هو اللاستجماتية . حين ينظر إنسان بعينه مثل هذا العيب نحو منظر الاختبار المبين في الشكل ٢٤ - ٣ أ فإن بعض الخطوط تبدو أكثر قتامة من الأخرى ويرجع هذا الى الشكل غير الكروي لعدسة العين فكمما تعلم تقوم العدسة الكروية بتركيز الأشعة المتوازية في نقطة واحدة هي النقطة البؤرية . أما عدسة العين التي شوه شكلها فتعمل عادة كعدسة كروية مع عدسة أسطوانية متراكبة عليها . ويمكن مشاهدة تأثير العدسة الأسطوانية بفحص الشكل ٢٤ - ٣ (ب) ، (ج) ، (د) .



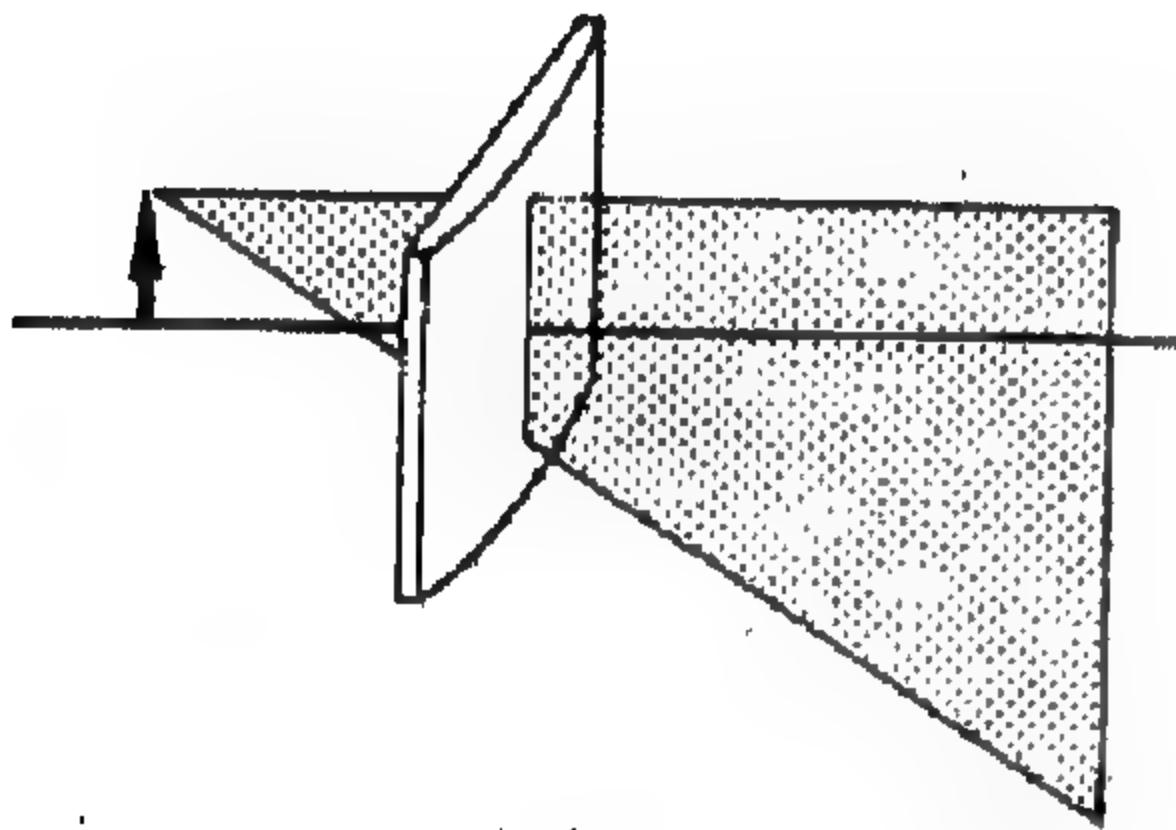
(ب)



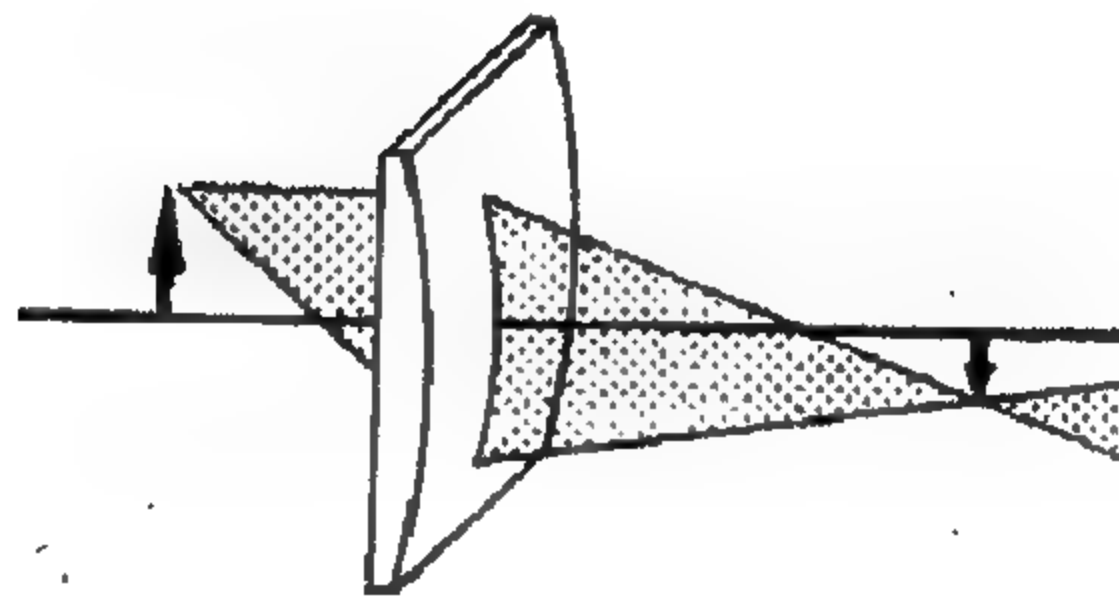
(أ)

شكل ٢٤ - ٣

تكون العدسات الأسطوانية صوراً خطية بدلاً من النقطية وتتركز الخطوط الموجودة في مستويات مختلفة بطريقة مختلفة كما هو مبين في (ج) و (د)



(د)



(ج)

لاحظ في الجزء (ب) أن العدسة الأسطوانية تركز الأشعة المتوازية في خط بدلاً من نقطة . والأشعة الواقعة في مستوى عمودي على محور الأسطوانة كما في (ج) تتركز في نقطة ، أما الأشعة التي تقع في مستوى يوازي محور الأسطوانة فلا تتركز على الإطلاق كما في (د) . ونتيجة لهذا فإن عدسة العين تركز الخطوط المبينة في الجزء (أ) في مواضع مختلفة ، فعندما يكون خط رأسي في البؤرة الصحيحة فإن الخط الأفقي ، مثلاً ، ربما لا يكون في البؤرة ، وتبعاً لهذا فإن الخطوط المتجهة بزوايا مختلفة ستبدو مختلفة لشخص مصاب بهذا العيب . ولمعالجة هذا يجب استعمال نظارة تلاشي بالضبط تأثير عدسة العين الأسطوانية .

مثال توضيحي ٢٤ - ١ : يستطيع شخص ذو طول نظر أن يقرأ الجريدة حين يسك بها على بعد 75 cm على الأقل من عينيه . ما هو البعد البؤري لعدسات نظارة القراءة اللازمة لهذا الشخص ؟ .

طريقة الحل : يراد لهذا الشخص أن يرى الحروف المطبوعة واضحة حين تكون الجريدة على بعد 25 cm من عينيه ، أى عند النقطة القريبة الطبيعية . ومن ثم تلزم عدسة تعطى صورة تقديرية عند $i = -75$ حينما يكون الجسم الحقيقي عند مسافة قدرها $p = 25$ cm باستخدام معادلة العدسة ،

$$\frac{1}{25} + \frac{1}{-75} = \frac{1}{f}$$

ومنها

$$f = 37.5 \text{ cm}$$

لاحظ أن العدسة المطلوبة هنا عدسة مجمعة

مثال توضيحي ٢٤ - ٢ ما هو البعد البؤري لعدسة تصحيحية لسيدة نقطتها البعيدة 50 cm

طريقة الحل : يجب على العدسة التصحيحية أن تكون صورة لجسم بعيد بحيث تكون الصورة تقديرية وتبعد 50 cm عن العين . وعلى هذا $i = -50$ cm و $p \rightarrow \infty$ وعلى ذلك تكون معادلة العدسة هي :

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{-50} = \frac{1}{f}$$

ومنها

$$f = -50 \text{ cm}$$

لاحظ أن العدسة المطلوبة هنا عدسة مفرقة

٢٤ - ٢ آلة التصوير (الكاميرا) البسيطة

تعمل آلة التصوير كالعين البشرية ، فهي تستخدم عدسة لإنتاج صورة لجسم ما على فيلم . والفيلم هنا يقوم بعمل الشبكية في العين . والرسم التخطيطي في الشكل ٢٤ - ٤ يبين آلة تصوير بسيطة . تكون الصورة مقلوبة على الفيلم وحجمها I يرتبط مع حجم الجسم بالعلاقة العادية ،

$$\frac{I}{O} = \frac{i}{p}$$

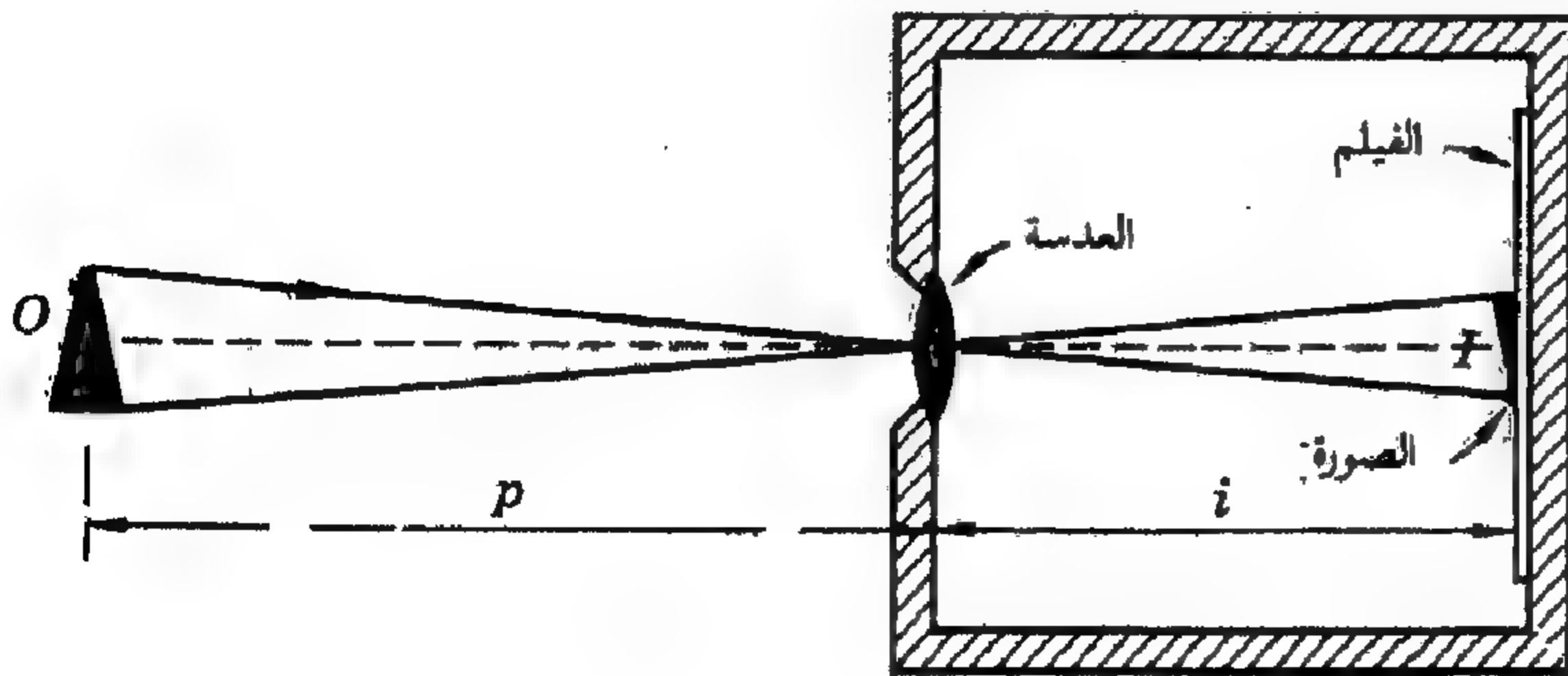
وعلى العكس من العين فإن عدسة آلة التصوير لا يمكن جعل بعدها البؤري متغيرا . ولذا للحصول على تركيز جيد للصورة على الفيلم فإن العدسة يجب أن تحرك للأمام وللخلف حين تتغير مسافة الجسم . وآلات التصوير التى ليس بها عدسات متحركة لديها عادة ثقب صغير مفتوح أمام العدسة ، أى أنها تعمل كالكاميرا ذات الثقب التى لا عدسات لديها مطلقا، فهى لا تستعمل سوى ثقب يسمح للضوء بالسقوط على الفيلم . وسيعالج عمل مثل هذه الآلة كسؤال فى نهاية هذا الفصل .

تحتوى آلات التصوير باهظة الثمن على أنظمة معقدة من العدسات بدلا من عدسة منفردة ودرجة التعقيد تكون ضرورية إذا أريدت صورة حادة جدا وسرعات فائقة للغلق . من الواضح كون الشرط الأول مفيدا . أما الشرط الثانى الخاص بسرعات الغلق فتتيح التقاط صور لأجسام تتحرك بسرعة ، فأى جسم متحرك لا بد وأن يجعل الصورة مشوشة الى حد ما ، ولكن كلما قصر الزمن الذى يكون فيه غالق آلة التصوير مفتوحا ، كلما قل تشويش الصورة الى حد ما . وحيث أن الغالق يجب أن يفتح مدة كافية تتيح لقدر كاف من الضوء أن يقع على الفيلم لذا فإن السرعات العالية للغلق تعنى أن تكون المدة كبيرة بدرجة تسمح لكمية من الضوء أن تدخل الى آلة التصوير .

وكما رأينا عند مناقشة معادلة العدسة لا يستخدم سوى الجزء الأوسط من عدسة كروية ، إذا أردنا الحصول على صورة واضحة . وتزداد أهمية هذا الأمر إذا استخدمت آلة التصوير لالتقاط صور عن قرب لأن العدسة وقتها يجب أن تكون محدبة جدا . ولا يمكن إزالة عيوب التركيز الملازمة لعدسة منفردة إلا باستعمال مجموعة مركبة من العدسات وعندئذ يقال أن العدسة قد صححت ضد الزعج الكروى .

وهناك عيب آخر للعدسات يسبب وجود أطراف ملونة بالصورة ويسمى الزعج اللوئى . وهو ينتج من حقيقة أن سرعة الضوء فى الزجاج تختلف باختلاف الطول الموجى . ونتيجة لهذا فإن معامل انكسار الزجاج ليس ثابتا لجميع الألوان فالضوء

عيوب العدسات



شكل ٢٤ - ٤
تكون آلة التصوير البسيطة صورة مقلوبة على الفيلم وفى الحياة العملية يكون الثقب الموجود أمام العدسة أضيق بكثير عما هو بين كما أن هناك غالقا يغطى الفتحة ولا يفتح إلا حين تلتقط الصورة

الأزرق يتركز بقوة أكبر في البؤرة بواسطة العدسة عن الضوء الأحمر وهذا يجعل الألوان في حزمة من الضوء العادي تتفرق فتصبح الصورة ملونة .

لتصحيح هذا العيب توضع طبقات من نوعين أو أكثر من الزجاج وتتكون منها العدسة. والعدسات الباهظة الثمن تتكون من عدة عدسات منفردة ملتصقة ببعضها البعض . وتسمى العدسة التي عولجت جزئياً ضد الزيغ اللوني بالعدسة اللالونية . على أنه من المستحيل إزالة هذا العيب من عدسة ما بشكل نهائى ، فالعدسات المستخدمة في الأجهزة الغالية مثل الميكروسكوبات الجيدة جداً عادة ما تكون معقدة جداً بالفعل ، فهي لا تصحح النظام فحسب ضد الزيغ الكروى واللونى وإنما تقوم بعمل تصحيح لعيوب أخرى بالعدسة أيضاً . وعلى هذا يكون تصميم جهاز ضوئى دقيق على درجة عالية من التعقيد . ويمكنك قراءة المزيد عن هذا الأمر في الكتب المتقدمة التي تبحث في البصريات الهندسية .

٢٤ - ٣ مجموعات العدسات المتقاربة :

وحدة الديوبتر

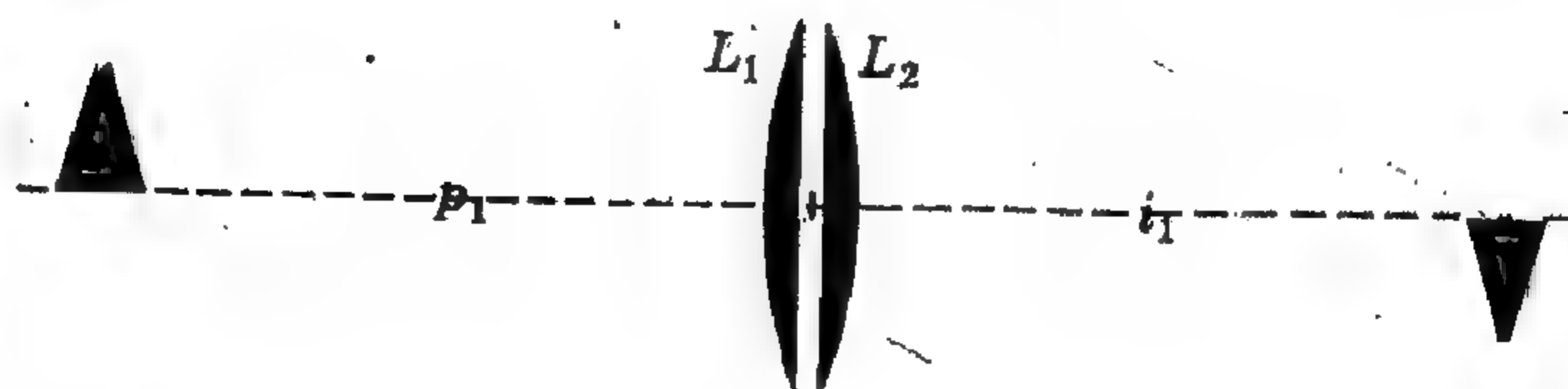
وما تكون قد فحصت عينيك ولاحظ أن من يفحصها يضع دائماً عدة عدسات دفعة واحدة أمام عينيك أحداها أمام الأخرى . ولكى يصل الى أنسب مجموعة من العدسات يحتاج الفاحص الى معرفة كيف يضيف تأثيرات العدسات الرقيقة التي تكون مجموعة متقاربة . ويمكن اشتقاق العلاقة المطلوبة بسهولة كما سنرى . وسنفرض فقط أن الأبعاد البؤرية للعدسات أكبر بكثير من المسافات بين العدسات .

بالرجوع الى الشكل ٢٤ - ٥ توجد أولاً الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى ،

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f_1}$$

ثم نستخدم هذه الصورة كجسم للعدسة الثانية فيكون بعد الجسم هو $p_2 = -i_1$ لذا ما تجاهلنا المسافة الضئيلة التي تفصل العدسات . أما الإشارة السالبة فقد استعملناها لأن الجسم يقع في الجانب الخاطئ للعدسة وقاعدة الاشارات التي اتفقنا عليها تستلزم أن يكون بعد الجسم سالبا في مثل هذه الحالات . والآن ، بكتابة معادلة العدسة للعدسة الثانية نجد أن :

$$\frac{1}{-i_1} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2}$$



شكل ٢٤ - ٥

إذا كانت العدستان قريبين جداً من بعضهما البعض فإن الزمما المشترك هو أن يعمل كعدسة واحدة بعدها البؤرى هو $1/f = 1/f_1 + 1/f_2$

إذا أضفنا هاتين المعادلتين الى بعضهما ، نجد أن

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f} \quad \text{أو} \quad \frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

حيث يعطى البعد البؤرى المشترك للعدستين بالمعادلة :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad \text{مجموعة مقاربة} \quad (٢٤ - ١)$$

للمجموعة العدسات

وكما نرى تتصرف عدستان رقيقتان تكونان مجموعة مقاربة وكأنهما عدسة واحدة بعدها البؤرى يعطى بالمعادلة (٢٣ - ١)

ولكى نوفر على الفاحص مشقة جمع المقلوبات ، نعرف وحدة جديدة تستخدم مقلوب البعد البؤرى . **قوة العدسة بالديوبتر** هي مقلوب البعد البؤرى بالأمتار ، فقوة عدسة مفرقة بعدها البؤرى 20 cm مثلا هي $\frac{1}{0.20} = 5$ diopeters -5 مثال توضيحي ٢٤ - ٣ : لصقت ثلاث عدسات أبعادها البؤرية على الترتيب هي 20 ، -30 ، 60 cm . أوجد البعد البؤرى للمجموعة .

تعريف

طريقة الحل : تكون قوى هذه العدسات كالتالى 5 ، $\frac{10}{6}$ ، $-\frac{10}{3}$ diopeters أما القوة المشتركة فهي

$$\frac{30}{6} - \frac{20}{6} + \frac{10}{6} = \frac{20}{6} \text{ diopeters}$$

وبهذا يكون البعد البؤرى للمجموعة هو $\frac{6}{20}$ أو 0.3 m . من الشيق ملاحظة أنه لو كانت العدسة -10 diopeters سالبة لكان أثر العدسات الثلاثة كأثر لوح من الزجاج المسطح تماما .

٢٤ - ٤ العدسة المكبرة (المكبر البسيط)

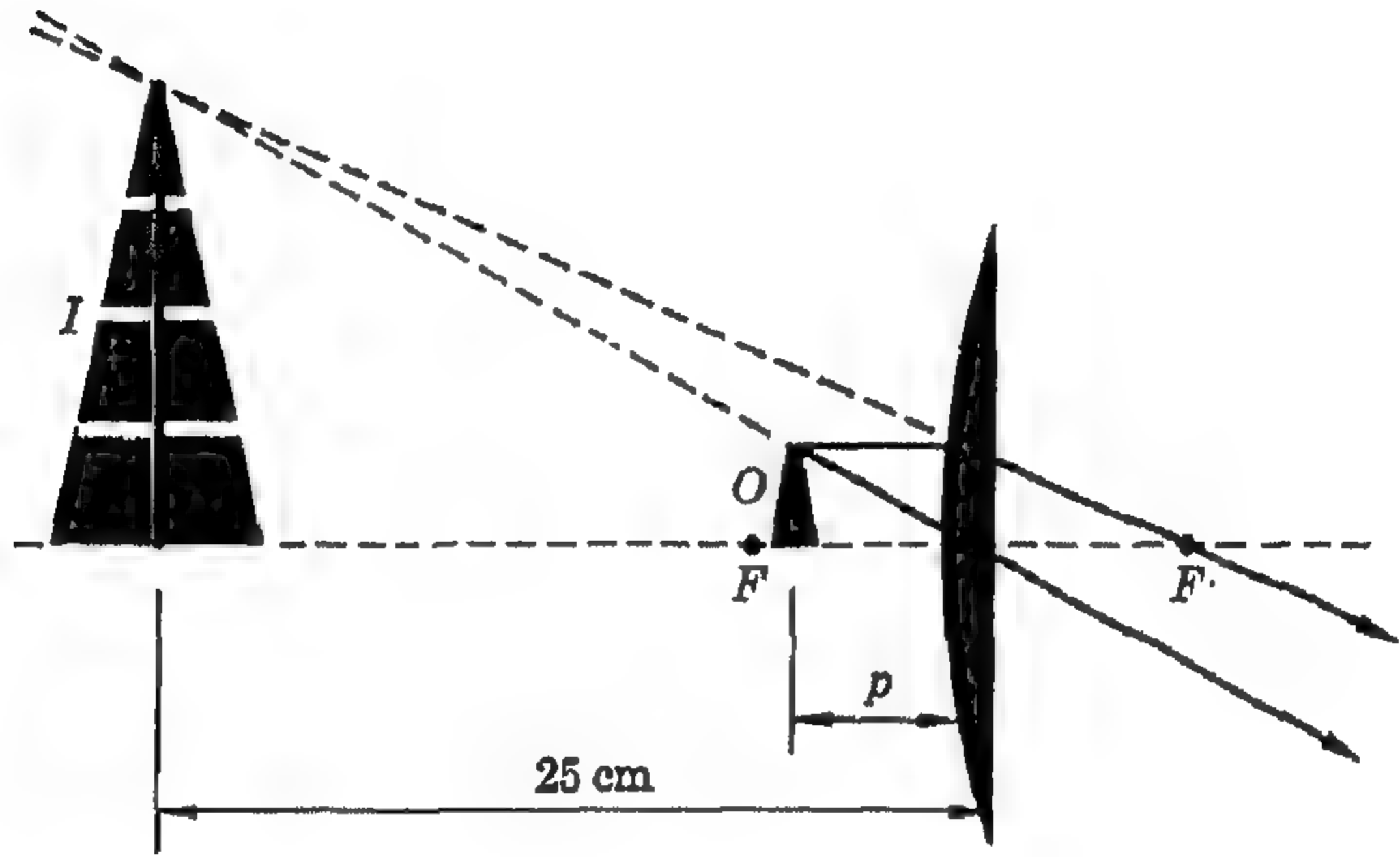
يستطيع الشخص الطبيعى أن يرى جسما ما بوضوح إذا كان يبعد 25 cm عن عينيه أو كان أبعد من ذلك . يوضح الشكل ٢٤ - ٦ الصورة المتكونة على شبكية العين عندما يوضع جسم عند تلك المسافة . ولو أننا استطعنا أن نركز الصورة بشكل صحيح حين يكون الجسم أقرب ، لأصبحت الصورة على الشبكية أكبر بكثير ، كما يبين الجزء (ب) من الشكل ٢٤ - ٦ ويمكن عندئذ رؤية التفاصيل الدقيقة للجسم بشكل أفضل لأنه سيظهر أكبر بكثير على الشبكية .

شكل ٢٤ - ٦
حين يقترب جسم من العين
فإن الصورة على الشبكية
يزداد حجمها



ولكى يرى جسم ما بوضوح ، أى ليتركز فوق الشبكية حين يكون أدنى من 25 cm فإننا نحتاج الى استعمال عدسة مجمعة لتساعد عدسة العين . ويوضح الشكل ٢٤ - ٧ أثر مثل هذه العدسة المكبرة . إذا وضع الجسم - كما ترى - داخل النقطة البؤرية للعدسة فإن صورة تقديرية للجسم تتكون أبعد بكثير من العدسة ، فإذا كانت العين خلف العدسة مباشرة فإن الصورة يمكن رؤيتها بوضوح إذا كانت تبعد 25 cm أو أكثر من العدسة كما هو مبين .

شكل ٢٤ - ٧
تتيح العدسة المكبرة أن
يوضع الجسم المفحوص على
مسافة من العين أقرب مما لو
استخدمت العين المجردة
بفردتها

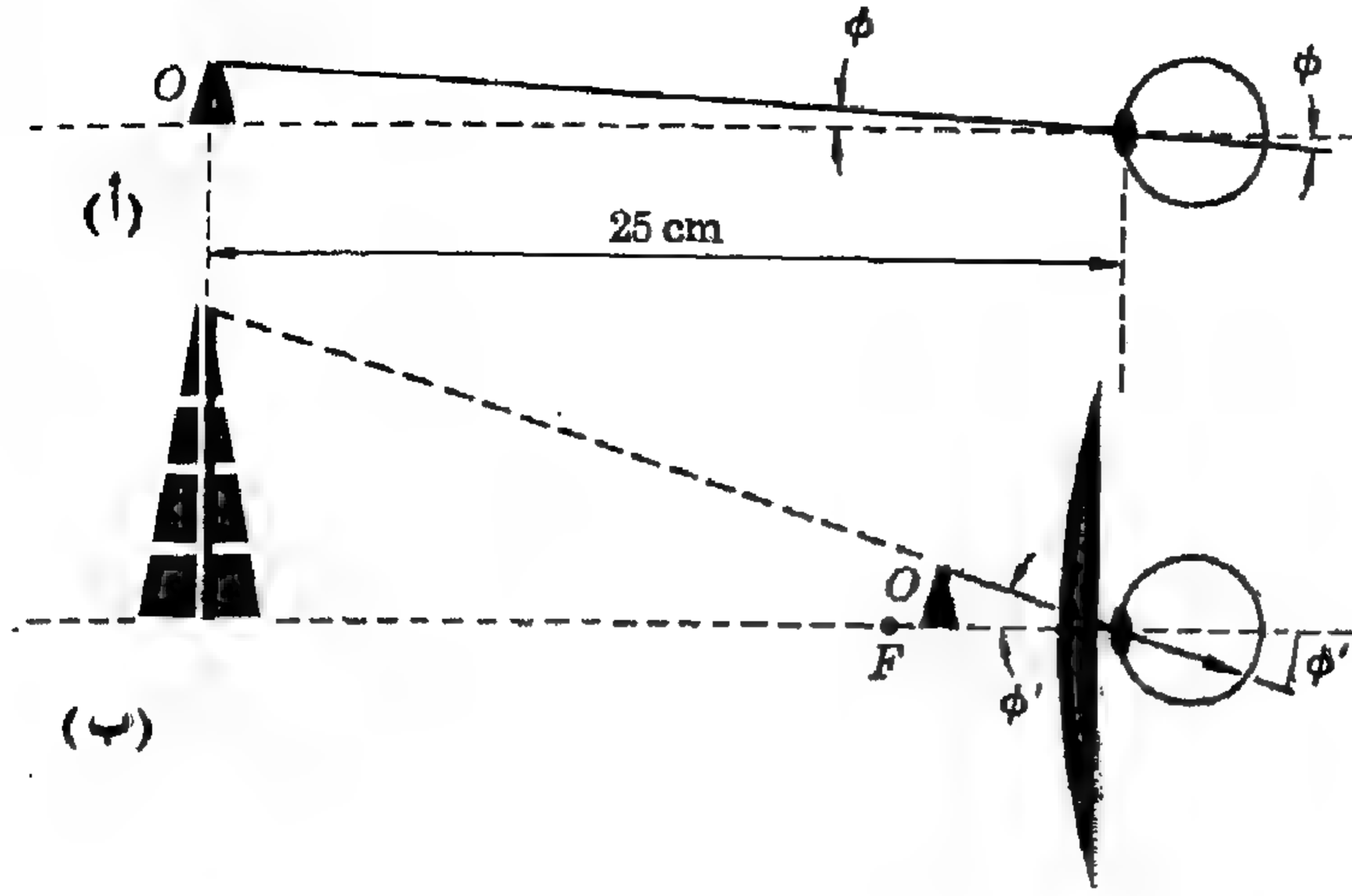


لندرس الآن ما هو أثر مثل هذه العدسة - اذا استخدمت بهذا الشكل - على حجم الصورة المتكونة على الشبكية . يوضح الشكل ٢٤ - ٨ أ الصورة المتكونة على الشبكية حين يبعد الجسم مسافة 25 cm عن العين بدون مساعدة العدسة المكبرة . أما الجزء (ب) من الشكل نفسه فيمثل إعادة للشكل ٢٤ - ٧ مع إضافة رسم العين التى ننظر فعلا الى الصورة التقديرية المتكونة بواسطة العدسة المكبرة . على أن حجم الصورة المتكونة على الشبكية هو نفسه لو أن العين تركزت على الجسم الحقيقى الذى يقرب الآن عن 25 cm . وعلى هذا فاستخدام العدسة يجعل الصورة على الشبكية أكبر عما لو لم تستخدم العدسة . وهذه هى النتيجة الحتمية لحقيقة أن العدسة قد أتاحت لنا رؤية الجسم على مسافة أقرب من النقطة القريبة الطبيعية وهى 25 cm . تعرف قوة التكبير M لنيطة ضوئية على أنها النسبة بين الزاوية المقابلة للصورة المتكونة على الشبكية حين تستخدم النيطة والزاوية المقابلة

قوة التكبير

للصورة حين يرى الجسم مباشرة على بعد 25 cm ، أو بالرجوع الى الشكل

٢٤ - ٨ ،



شكل ٢٤ - ٨
تتركز العين في كلتا الحالتين
على المثلث الذي يبعد عنها
25 cm . الجسم الحقيقي
يبعد عن العين بمسافة أقل
من 25 cm في (ب) وعلى
ذلك فالزاوية المقابلة له أكبر
بكثير

$$M = \frac{\phi'}{\phi}$$

وتختلف قيمة M الحقيقية الى حد ما حسب كيفية إمساك العدسة المكبرة وكيفية تركيز العين وهناك تقريب معتدل في مثل هذه الحالات وهو القول بأن العين خلف العدسة مباشرة وأن الجسم موضوع أقرب ما يكون الى النقطة البؤرية للعدسة . وعلى هذا فللزاويا الصغيرة التى عادة ما تستعمل فإن الزاوية تكون مساوية تقريبا لظلها ولجيبها . ومن ثم فمن الشكل ٢٤ - ٨ لدينا ،

$$\phi = \frac{O}{25} \quad \text{و} \quad \frac{O}{f} \approx \phi'$$

التي تعطينا ،

$$M = \frac{\phi'}{\phi} = \frac{25}{f} \quad \text{حيث } f \text{ بالسنتيمتر}$$

١٧ للمكبر وعند التناول الأكثر دقة لهذا الأمر نجد أن $M = (25/f) + 1$ ولكن لمعظم الأغراض تكفى المعادلة المعطاة آنفا (لماذا ؟) .

إذن فالعدسة ذات قوة التكبير الضخمة يكون بعدها البؤرى صغيرا ، أى أنها تكون مجمعة بشكل هائل . إذا كانت $f = 4 \text{ cm}$ فإن قوة التكبير تكون 6.25 ويبدو الجسم مكبرا حوالى ستة أضعاف عما لو رأيناه بدون العدسة المكبرة .

٢٤ - ٥ الميكروسكوب (المجهر)

لقد رأينا في القسم السابق أن قوة التكبير لعدسة مكبرة بسيطة هي $25/f$ ولما كان يجب وضع الجسم بداخل البعد البؤرى للعدسة ، فمن المستحيل جعل f قصيرة الى أقصى حد . أى أن قوة التكبير محدودة بهذا الاعتبار وكذا اعتبارات عملية أخرى . أما الميكروسكوب المركب فيتيح تكبيرا أعظم باستخدام عدستين مجتمعين والشكل ٢٤ - ٩ يعرض رسما للميكروسكوب .

في هذه البسيطة تقوم العدسة الأولى وهى العدسة الشيئية ، بتكوين صورة حقيقية I_1 للجسم . لاحظ أن الجسم يوضع خارج النقطة البؤرية للشيئية مباشرة . ولما كانت $I/O = i/p$ فإن I_1 تكون أكبر من الجسم بمعامل قدره i_1/p_1 . ولما كان الجسم يوضع عادة بالقرب من النقطة البؤرية ، إذن $p_1 \approx f_1$. بالإضافة الى هذا فالصورة I_1 ستكون قريبة من العدسة الثانية كما سنرى حالا وبالتالي فإن i_1 ستكون بالضرورة مساوية لطول قصبة الميكروسكوب التى تبلغ فى معظم الحالات حوالى 18 cm وعلى هذا ستبلغ I_1 حوالى $18/f_1$ مرة أكبر من الجسم الأصيل .

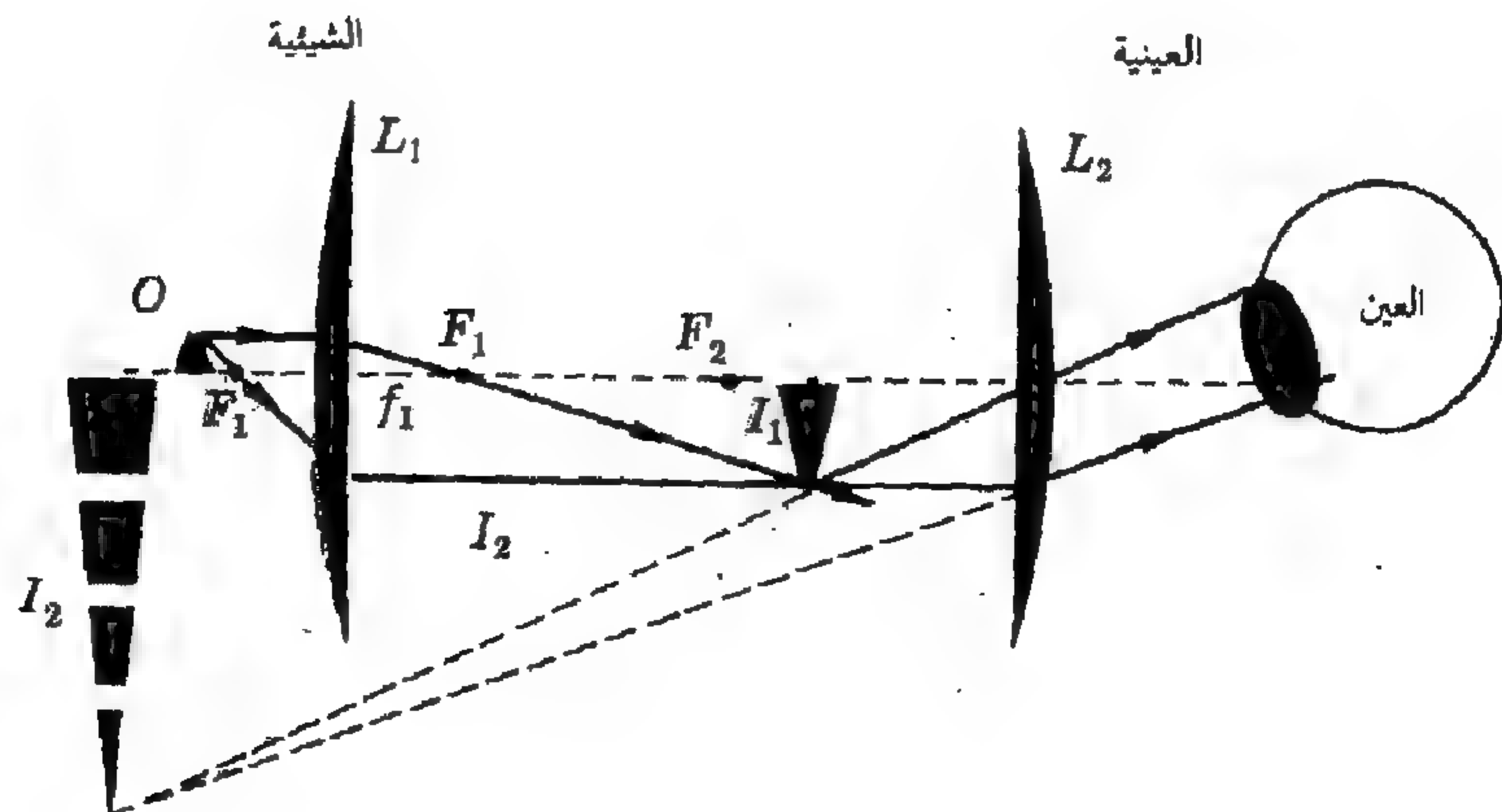
أما العدسة الثانية وهى ، العدسة العينية ، فستستخدم لرؤية الصورة التى كونتها العدسة الشيئية . وعلى هذا فإن I_1 يجب أن تقع بداخل بعدها البؤرى الصغير نوعا ما ، والأكثر من هذا ، فللرؤية الجيدة يجب أن تكون الصورة التقديرية I_2 التى تكونها العينية على بعد 25 cm تقريبا من العدسة العينية . وكما بينا فى القسم السابق فإن قوة التكبير للعدسة العينية لو استخدمت كعدسة مكبرة تكون $25/f_2$ على أن العدسة الشيئية قد كبرت الجسم بالفعل بمعامل قدره $18/f_1$ ولذا فالزاوية المقابلة للصورة I_1 عند العين المجردة تبلغ $18/f_1$ مرة قدر الزاوية المقابلة للجسم الاصلى . ومن ثم فقوة التكبير الكلية للميكروسكوب هى

M لميكروسكوب بسيط

$$M = \left(\frac{18}{f_1} \right) \left(\frac{25}{f_2} \right)$$

شكل ٢٤ - ٩

ترى العين الصورة النهائية I_2 . لقد زاد الميكروسكوب كثيرا من الزاوية المقابلة عند العين



حيث f_1 ، f_2 بالسنتيمترات

يجب - كما نرى - جعل f_1 ، f_2 صغيرين لكي نحصل على أقصى تكبير .
ولإنجاز هذه المهمة يستخدم في الميكروسكوبات الجيدة مجموعات معقدة من العدسات مكان العدسة العينية والعدسة الشيئية . ويجب توفر العناية الفائقة عند تصميم العدسات والا تسببت أنواع الزيغ المختلفة في العدسات في تشويه وتلوين الصورة بشكل خطير يؤدي الى جعل الجهاز عديم القيمة تقريبا .

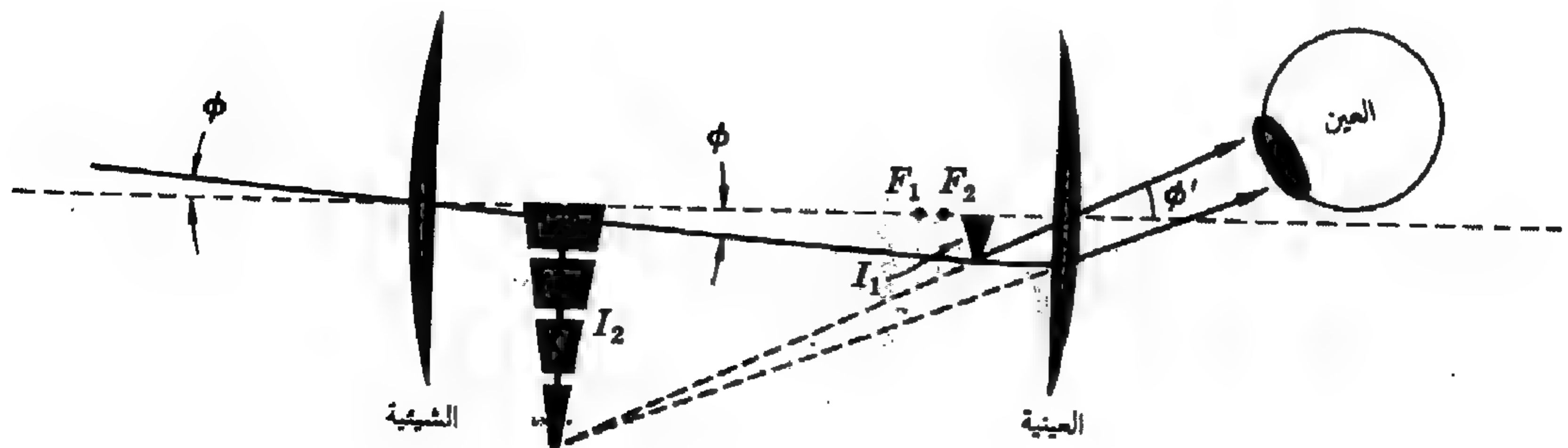
٢٤ - ٦ التلسكوب (المقراب) الفلكي

هناك مشكلتان رئيسيتان تواجهان الفلكيين عند تصميمهم لتلسكوب يستخدم لرصد القمر أو بعض الكواكب البعيدة ، فهم يريدون أن يبدو الجسم أكبر مما يرى بالعين المجردة وهم يريدون أيضا أن يزيدوا من كمية الضوء الخافتة التي تصل الى العين المجردة مباشرة من الكوكب . وللتغلب على المشكلة الأخيرة فهم يستخدمون عدسة شيئية أو عدسة تكون من الكبر بحيث تجمع قدرا كبيرا من الضوء من النجم ، فأحد التلسكوبات في مرصد بيركس به عدسة شيئية يبلغ قطرها 40 in وبعدها البؤري 62 ft من الواضح أن مثل هذه العدسة الضخمة ستجمع أكبر بكثير مما تجمع فتحة العين الصغيرة جدا ويوضح الشكل ٢٤ - ١٠ ذلك التلسكوب .

شكل ٢٤ - ١٠

يزيد التلسكوب ذي العدستين الموضح من الزاوية المقابلة عند العين بشكل كبير ولكن الصورة النهائية تكون مقلوبة

تكون الشيئية - كما هو موضح - صورة I_1 للجسم البعيد وتكون هذه الصورة قريبة جدا من F_1 ، وهي النقطة البؤرية للعدسة الشيئية ، وذلك لأن الضوء الصادر من الجسم البعيد يكون متوازيا تقريبا . تقوم العدسة العينية كالمعتاد بعمل عدسة مكبرة للنظر الى الصورة التي كونتها العدسة الاولى .



من الطبيعي أن تكون الصورة المتكونة بالعدسة العينية تقديرية وتبعد 25 cm عن العدسة العينية .

لإيجاد قوة تكبير هذه النسيطة نلاحظ أنه لو نظرت العين المجردة الى الكوكب البعيد فإن الزاوية المقابلة ϕ ستكون هي نفسها بالنسبة للعدسة العينية . (لماذا ؟) . وعلى ذلك فلو كانت ϕ صغيرة بحيث يمكن وضع ظلها مكانها فان ،

$$\phi \approx \frac{I_1}{f_1}$$

وذلك لأن الصورة قريبة جدا من النقطة البؤرية . وحيث أن النقطة البؤرية للعدسة العينية المكبرة هي أيضا بالقرب من I_1 فان ،

$$\phi' \approx \frac{I_1}{f_2}$$

إذا قسمنا المعادلة الأخيرة هذه على المعادلة الأولى فاننا نجد قوة تكبير التلسكوب .

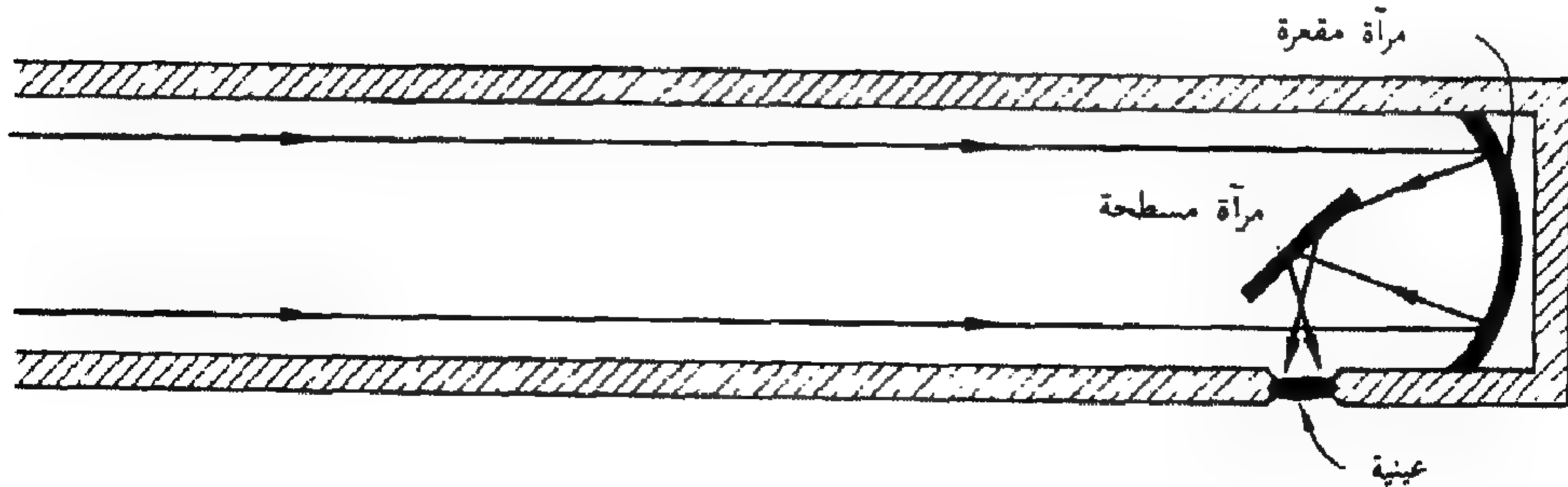
M للتلسكوب

$$M = \frac{\phi'}{\phi} = \frac{f_1}{f_2}$$

ومن هنا نرى أن البعد البؤري للشبيئية يجب أن يكون طويلا وأن البعد البؤري للعينية يجب أن يكون قصيرا .

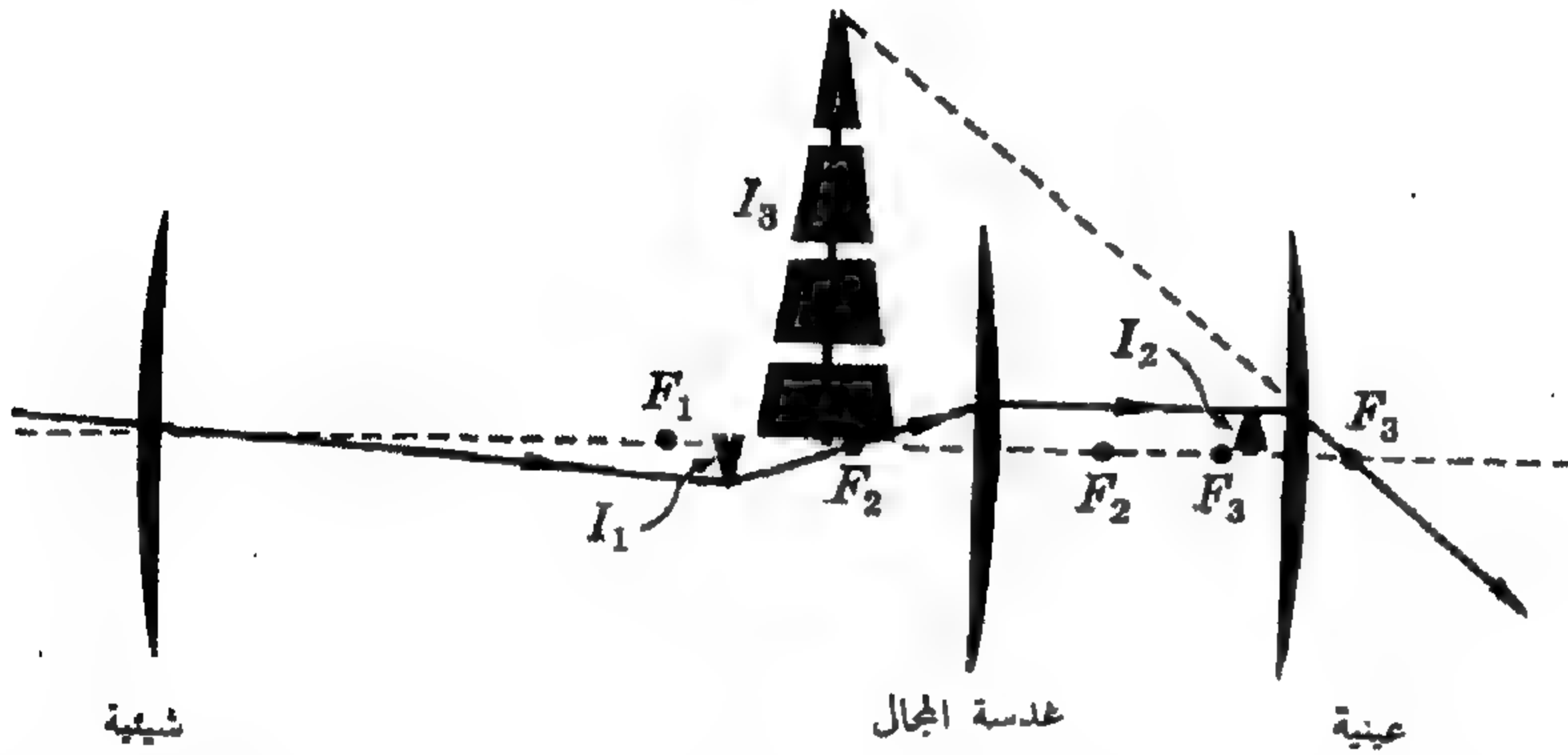
لما كان من الصعب عمل عدسات كبيرة كاملة فإن كثيرا من التلسكوبات الفلكية تستخدم مرآة مقعرة مكان العدسة الشبيئية . وأحد الترتيبات المتبعة في مثل تلك التلسكوبات موضع في الشكل ٢٤ - ١١ ، وقد بولغ في حجم المرآة الحافة المسطحة . ولا يتأثر التلسكوب العاكس بالزيف اللوني إلا عند العينية . علاوة على ذلك ، يمكن إلغاء الزيف الكروي من المرآة باستخدام مرآة مكافئة المقطع . ولما كان من الأسهل صنع مرايا جيدة كبيرة عن صنع عدسات كبيرة فانه يصبح واضحا سبب تفضيل التلسكوبات العاكسة أحيانا .

شكل ٢٤ - ١١
رسم تخطيطي لتلسكوب
عاكس . المرآة المسطحة
أصغر بكثير عما هي عليه في
الرسم



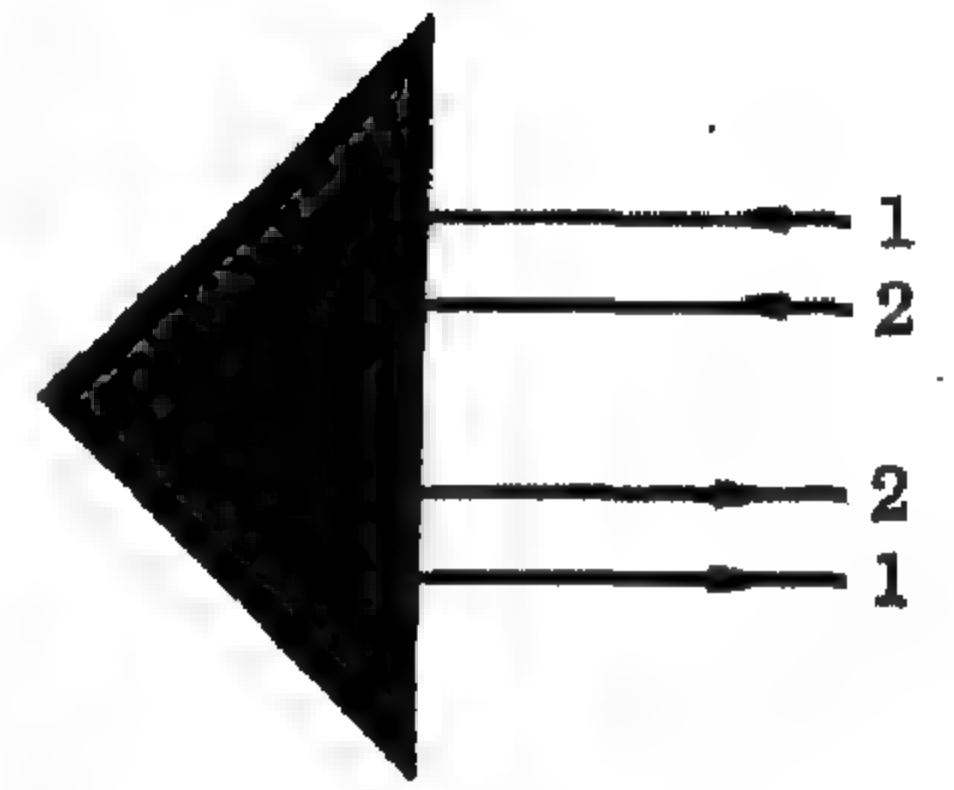
٢٤ - ٧ التلسكوب (المقراب) الأرضى

على الرغم من أن التلسكوب الفلكى يفى بأغراض رصد النجوم إلا أنه غير صالح تماماً لمعظم العمل على الأرض وتنشأ الصعوبة من أن التلسكوب الفلكى يقلب الصورة كما هو واضح بالرجوع الى شكل ٢٤ - ١٠ ولرؤية الأشياء معتدلة فإن التلسكوب الأرضى يستعمل عدسة ثالثة كما هو مبين فى الشكل ٢٤ - ١٢ لاحظ أن عدسة المجال موجودة لمجرد أن تقلب الصورة I_1 إلى I_2 وأن الصورة النهائية التى تراها العين ، I_3 هى صورة معتدلة .



شكل ٢٤ - ١٢
التلسكوب (المقراب)
الأرضى . لم يعط فى الشكل
سوى شعاع واحد وعليك مع
هذا الثبات أن الصور تتكون
فعلا فى المواضع المبينة

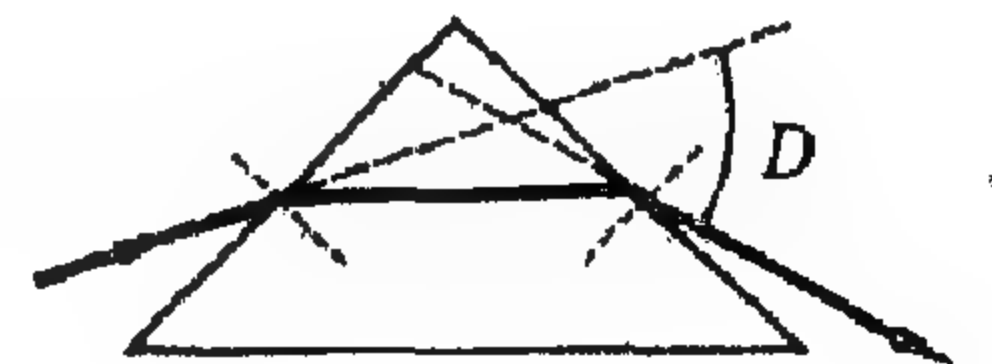
توجد هذه البنية عادةً فى أنبوبة طويلة نوعاً ما وعادة تسمى نظارة مقرية وهى ليست ملائمة للإستعمال وتستبدل فى أغلب الأحوال بمنظار ثنائى العينية منشورى ويتم فى هذه البنية قلب الصورة بالانعكاس الكلى الداخلى بداخل منشورين . يقوم المنشور الأول بعكس الصورة كما هو موضح فى الشكل ٢٤ - ١٣ . بينما يقوم المنشور الآخر وهو عمودى على الأول بتحويل الشعاع مرة أخرى ويعكس الإتجاه الأفقى للصورة . ولا تعيد المنشورات الصورة الى اتجاهها الصحيح فحسب ولكنها تقصر طول الأنبوبة بين الشيئية والعينية بشكل كبير .



شكل ٢٤ - ١٣
الصورة المقلوبة فى منظار ثنائى
العينية تتحول الى معتدلة
بالانعكاس الكلى الداخلى
فى المنشور كما هو موضح

٢٤ - ٨ (الاسبيكتروسكوب (المطيف) المنشورى

سنتحدث بشكل متواتر فى الفصول القادمة عن الطيف (أو ألوان الضوء) الذى تصدره الذرات المختلفة . وهذه الأطياف يمكن مشاهدتها بواسطة أجهزة تسمى اسبيكتروسكوبات (أو مطاييف) وهى تنقسم الى نوعين ، سنناقش هنا نوعاً واحداً فقط منها ، أما الثانى فسنتناوله فى الفصل القادم . فاهتمامنا الآن سينصب على الإسبيكتروسكوب المنشورى .



هناك بنية كثيرة ما تستخدم لفصل الضوء الى ألوان متعددة وهى المنشور الذى يصنع عادة من الزجاج وهناك رسم يوضحه فى الشكل ٢٤ - ١٤ . فشعاع الضوء ينحني عادة مرتين الأولى حين يدخل والثانية حين يخرج من المنشور . وتسمى الزاوية الكلية التى ينحني بها الشعاع زاوية الانحراف وهى الزاوية D فى الشكل

شكل ٢٤ - ١٤
يحرف المنشور الموضح شعاع
الضوء بزاوية قدرها D



صورة
مأخوذة عن مكتب الاستعلامات والانحياز
الاسترالي ، تصوير د. مود

علم الفلك الاشعاعى

لقد ظلت التلسكوبات البصرية هي الوسيلة الحساسة الوحيدة للنظر الى أعماق الفضاء . وهذه التلسكوبات تتحدد الرؤية فيها بالأطوال الموجية للإشعاع الكهرمغناطيسى الذى يمكن رؤيته بالعين أو تصويره . ويشكل هذا المدى - كما نعلم - جزء صغيرا من العليف الكهرمغناطيسى الكلى يستتبع هذا أن التلسكوبات البصرية قادرة فقط على رصد تلك الأجسام الموجودة فى الفضاء الخارجى والتي تبعث ضوء قويا . ومن الطبيعى أن هذه الأجرام يجب أن تكون محماة للدرجة الإيضاض حتى تظهر مضئبة .

ولابد أن نتساءل عما إذا كنا نفتقد الكثير مما يوجد فى الفضاء الخارجى، وذلك لأننا لا نرى بالتلسكوبات البصرية سوى الشمس الساخنة وهي الأجرام المتوهجة . ولو أمكننا أن « نرى » أجراما أكثر برودة فى الفضاء ، فرمما وجدنا أجراما جديدة كالشموس التى بردت أو شموسا لم تولد بعد . ولهذا الغرض يلزمنا نبطات تستطيع رؤية أطوال موجية أطول من الضوء المرئى وعلى وجه الخصوص تلك التلسكوبات التى تستطيع رؤية أمواج اللاسلكى والتى ستكون ذات قيمة هائلة . ومن هنا جاء الباعث على التسمية - علم الفلك الاشعاعى .

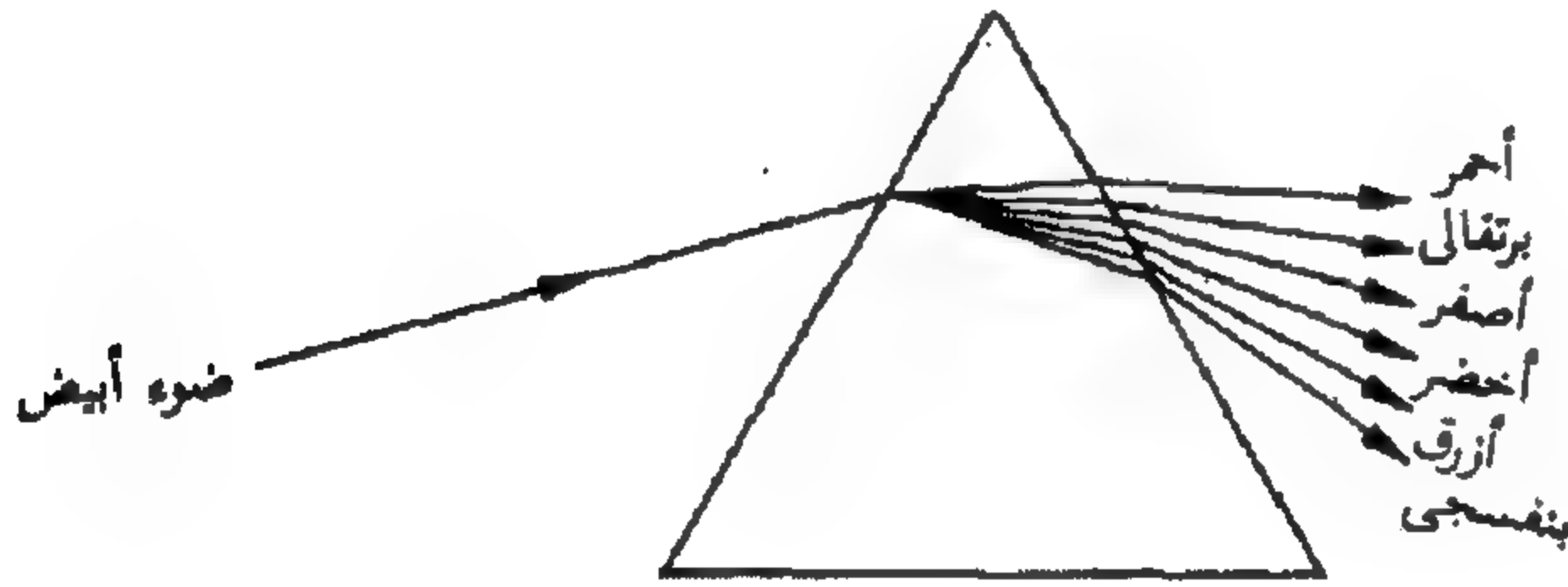
كما سنرى فى الفصل الخامس والعشرين ، يجب أن يكون هناك سطح أملس بدرجة تبلغ الطول الموجى للإشعاع حتى يمكن عكس أمواج ك.م. أما حجم العاكس فيجب أن يكون العديد من الأطوال الموجية . وتتطلب هذه القيود أن يستخدم التلسكوب الإشعاعى من النوع . العاكس مرايا معدنية أكبر بكثير من الأطوال الموجية التى يراد رؤيتها به . على أن هذه المرايا لا تتطلب أن تكون على نفس القدر من النعومة التى تكون عليها المرايا المستخدمة للأطوال الموجية الأقصر . وفى الواقع يمكن استخدام سطحا من شبكية سلكية وقد تم هذا فعلا . وكلما كبرت المرآة زادت بالتالى كمية الطاقة التى تستطيع عكسها وتركيزها فى بؤرة، ولذا يفضل العاكس كلما كبر .

يوضح الشكل صورة لتلسكوب إشعاعى ضخيم وهو يقع فى بقعة معزولة فى استراليا بعيدا عن أية مصادر للضوضاء اللاسلكية الصادرة عن مولدات موجودة على ظهر الأرض . وقد أمكن، بواسطة هذا التلسكوب وغيره فى بقاع كثيرة من العالم اكتشاف كثير من الأجرام المجهولة حتى الآن فى الأغوار السحيقة للفضاء . تستخدم النبطه المصورة أطوالا موجية مدى 10 cm و 20 cm وهي قادرة على اكتشاف مصادر للأمواج اللاسلكية تبعد عنا 5 مليون سنة ضوئية أى 10 مرات أبعد مما يمكن رؤيته بأى تلسكوب بصرى متاح الآن .

تقوم المرآة العاكسة وقطرها 210 ft مع شبكة معدنية مكافئة المقطع بتركيز أمواج اللاسلكى الواردة من الفضاء الخارجى ، ثم تقوم أجهزة استقبال الموجات بمتابعة ما يراه التلسكوب . وهناك وسائل تكفل دوران العاكس الضخم بحيث يوجه التلسكوب حسب الرغبة نحو أية مساحة من السماء ترتفع 30° فوق الأفق .

بمعرفة زاوية السقوط وزوايا المنشور وكذا معامل انكسار الزجاج فإنه يصبح من الممكن - على الرغم من الصعوبة - حساب D باستخدام قانون سنل . على أنه يمكن ملاحظة أنه كلما كبر معامل الانكسار للزجاج ، زاد انحراف الشعاع . ولهذا أثاره الهامة كما سنرى .

لقد ذكرنا من قبل أن سرعة الضوء في كثير من المواد تتغير اعتمادا على الطول الموجي للضوء وهذا يكافئ القول بأن معامل الانكسار عادة ما يعتمد على لون الضوء . ولعظم المواد يكون معامل الانكسار للضوء البنفسجي أكبر منه للضوء الأحمر ، ومن ثم ينحني الضوء البنفسجي بصورة أشد من الضوء الأحمر داخل منشور زجاجي . وتبعاً لهذا فإذا دخل شعاع من الضوء الأبيض في منشور ، كما في الشكل ٢٤ - ١٥ ، فإن الضوء يتفرق إلى ألوانه المختلفة كما في الشكل . وتختلف القابلية على تفريق الضوء من مادة لأخرى . وللحصول على تفريق مرتفع يجب أن يتغير معامل الانكسار مع الطول الموجي بشكل ملحوظ .

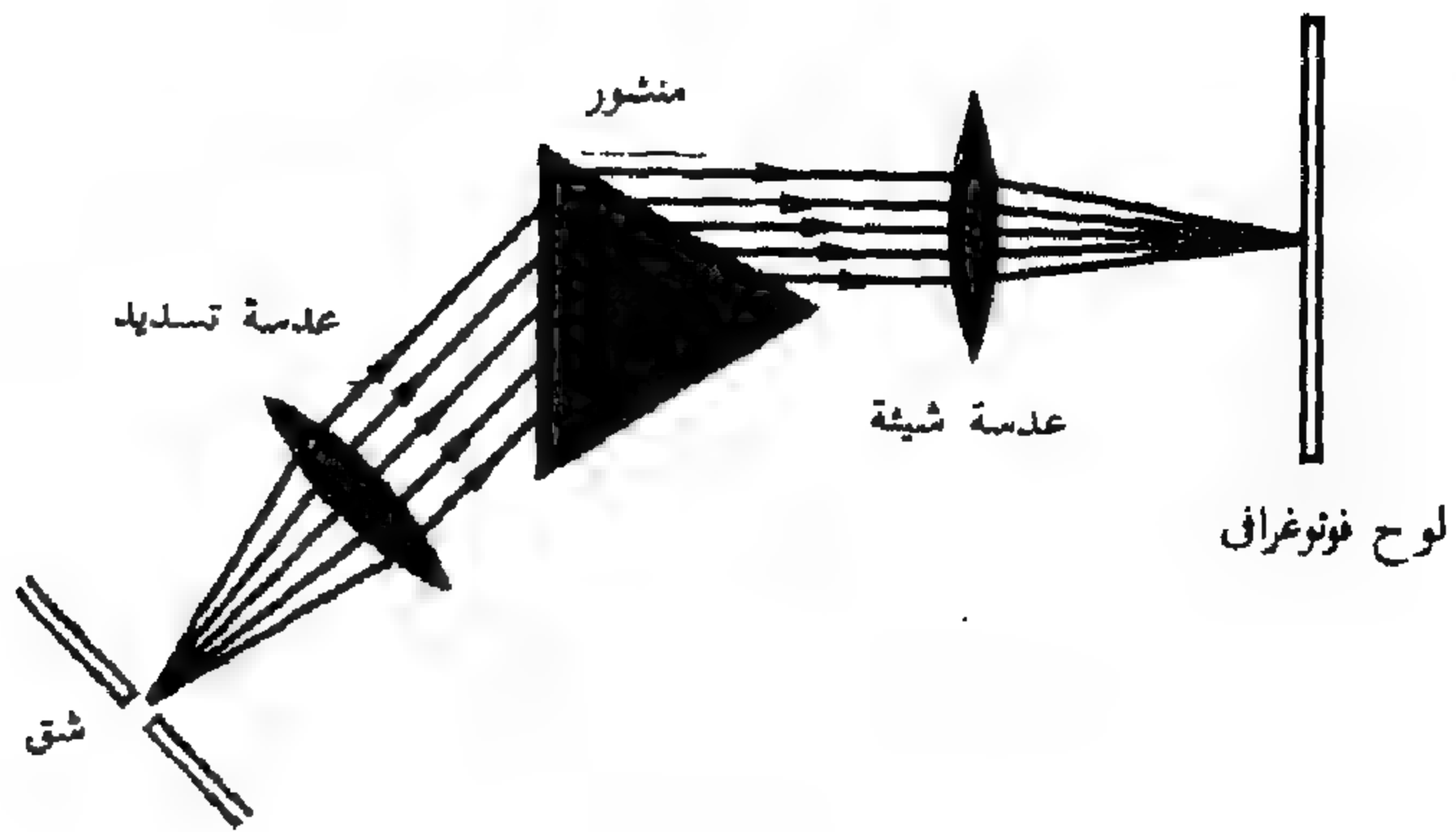


شكل ٢٤ - ١٥
ليست زاوية الانحراف بواسطة المنشور هي نفسها لجميع الأطوال الموجية وهذا يفرق المنشور الضوء الأبيض إلى مكوناته من الألوان .

في الإسبيكتروسكوب المنشوري يقوم المنشور بتفريق الأطوال الموجية للضوء القادم من المصدر الضوئي المراد فحصه . يأتي الضوء في نبيطه نموذجية ، كالتي في الشكل ٢٤ - ١٦ ، من المصدر إلى شق ضيق فيضيئه (لنفترض أن قوساً أصفر من الصوديوم يضيء الشق بحيث يصدر الشق أطوالاً موجية قريبة جداً من 5.89×10^{-5} cm وهو الضوء الأصفر (المميز) . ولما كان الشق يقع عند النقطة البؤرية لعدسة تسديد لذا تخرج منها الأشعة متوازية ثم تنكسر بالمنشور كما هو مبين (حيث أننا نفترض ضوءاً أحادي اللون أي ضوء له لون واحد لذا ينحني الضوء كله بنفس الطريقة) . تكون العدسة الشيئية صورة للشق عند نقطتها البؤرية فلو أن لوحاً فوتوغرافياً وضع كما هو مبين بالشكل لالتقطت صورة خط واحد أو صورة الشق ، على هذا اللوح . ويمكن بالتبادل وضع تلسكوب مكان العدسة الشيئية واللوح الفوتوغرافي (وذلك لأن الضوء متوازي) وبهذا يمكن رؤية الخط الأصفر أو صورته بالعين مباشرة .

أما إذا استعمل ضوء من قوس زئبقي بدلا من ضوء الصوديوم ، فإن العديد من الخطوط سوف يصور فوتوغرافياً على اللوح وستبدو تلك الخطوط كما في الشكل

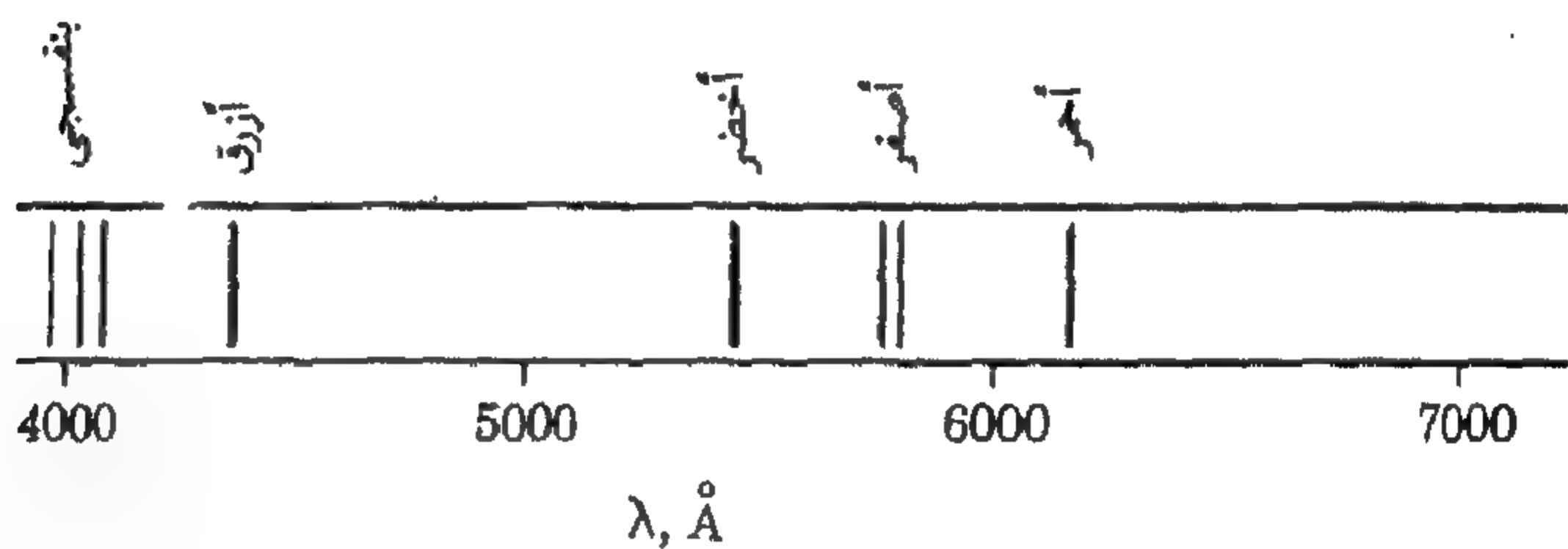
يمكن الحصول على صورة
الشفق على اللوح الفوتوغرافى
بالإسبكتروسكوب
المنشورى . ولكن إذا كان
الضوء يمتدى على أكثر من
طول موجى فإن صورة
متعددة ستظهر فى الصورة
الفوتوغرافية



خطوط العتيف

٢٤ - ١٧ . (هذا الطيف موضح بالألوان داخل اللوحة الملونة) . ولما كان كل من الألوان المحددة المتعددة والتي يبعث بها القوس الزئبقى ينحرف بصور مختلفة بواسطة المنشور لذا يظهر على اللوح الفوتوغرافى صورا متعددة للشق (أو الخطوط) . وتسمى صور الشق هذه خطوط الطيف وكل من هذه الخطوط هو نتيجة لضوء محدد بعته المصدر الضوئى . يعطى كل نوع من الذرات خطوط الطيف تكون مميزه لهذا النوع من الذرات : ولا يتيح لنا الضوء الصادر من الذرات حين نلاحظه فى الاسبيكتروسكوب أن نعرف نوع الذرات الموجودة فحسب ، ولكنه يفيد بقدر كبير من المعلومات حول تركيب الذرة نفسها وسنقوم بتعقب هذه النقطة الى أبعد من هذا فى فصل تال

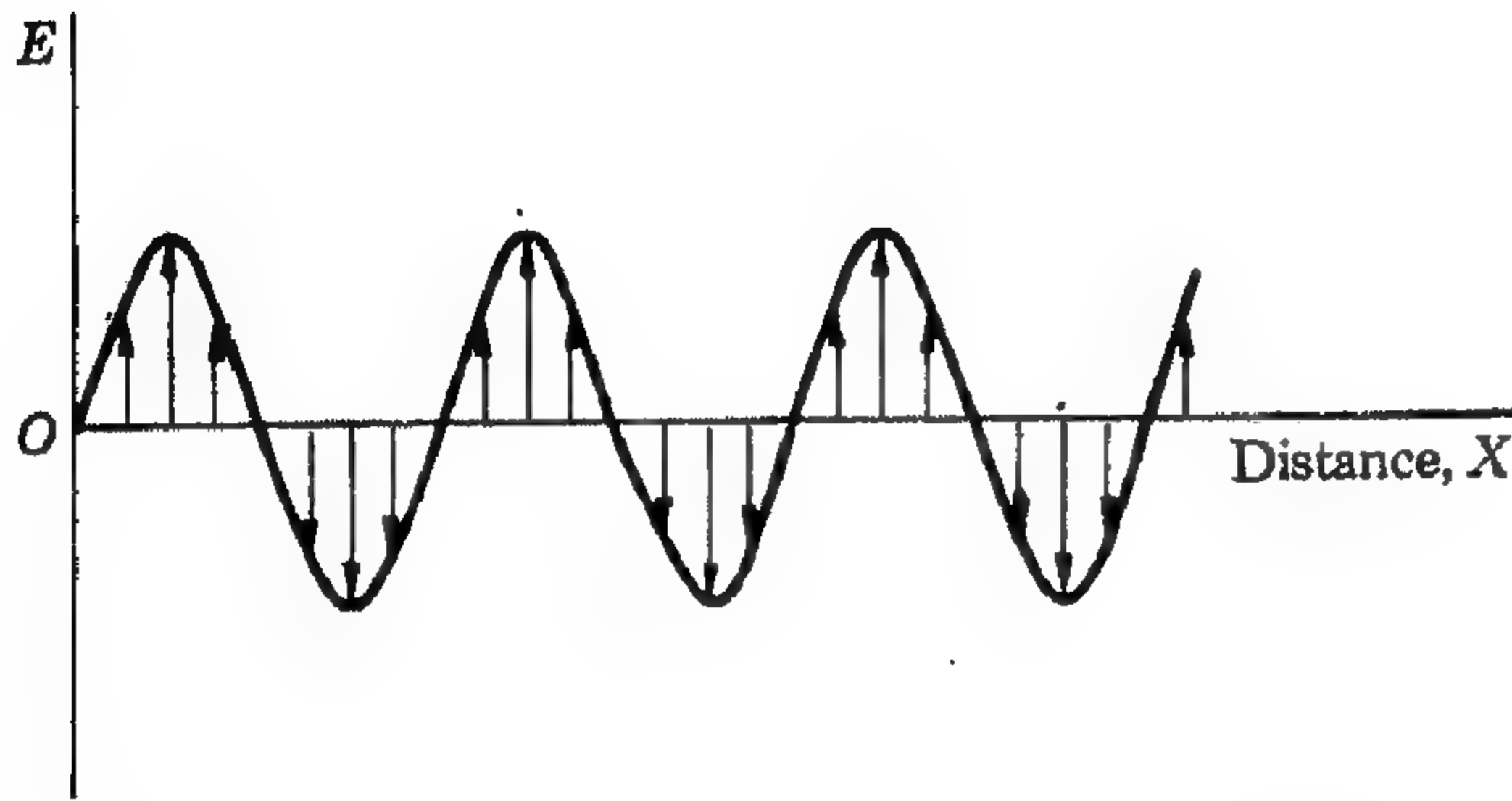
حين يستخدم مسكرو متر
لتصوير شق فوتوغرافيا بحيث
كان الشق مضاء بقوس
زئبقى فان العديد من صور
الشق (أو خطوط الطيف)
سوف يظهر فى الصورة
الفوتوغرافية كما هو مبين هنا .



٢٤ - ٩ الضوء المستقطب

تستفيد كثير من النبيطات الضوئية من حقيقة أن الضوء عبارة عن ذبذبات مستعرضة وهذه الحقيقة ذات أهمية كما سنرى - حين ينفذ الضوء خلال مواد معينة . كما أنها تشكل عاملا هاما عند انعكاس الضوء . وعلى الرغم من أن مناقشتنا السابقة لم تكن بهذه السمة للأمواج الضوء ، إلا أنها سمة أساسية لسلوك الضوء وسنقوم الآن بدراستها .

لقد رأينا في فصول سابقة أن الضوء هو إشعاع كهرومغناطيسي يتكون من موجات كالتى فى الشكل ٢٤ - ١٨ بحيث يكون متجه المجال الكهربائى جيبيا ومتعامدا مع اتجاه انتشار الموجة كما هو مبين . لو كانت الموجة تنتشر على طول محور X فى الشكل فإن المجال الكهربائى يهتز الى أعلى وإلى أسفل عند نقطة معينة من الفراغ الذى تنتقل خلاله الموجة . هناك أيضا موجة مجال مغناطيسى متعامدة مع الصفحة وتواكب المجال الكهربائى ويطلق على مثل هذه الموجة موجة مستقطبة استوائيا . وقد اشتق هذا الاسم من حقيقة أن المتجه الكهربائى يهتز فى مستوى واحد فقط وهو مستوى الصفحة فى هذه الحالة .



شكل ٢٤ - ١٨
يهتز المتجه الكهربائى فى
مستوى واحد حين يكون
الشعاع الضوئى مستقطب
استوائيا

يتكون معظم الضوء من العدد العديد من الموجات كمثل تلك المبينة فى الشكل ٢٤ - ٨ . لو كان اتجاه الانتشار الى اليمين فإن المتجهات تهتز جميعا عموديا على محور X كما فى الشكل ٢٤ - ٨ أ على أنهم ليسوا بحاجة لأن يهتزوا فى مستوى الصفحة ، وفى الواقع لا يفعل معظمهم ذلك . لنفترض أننا نقف عند نهاية محور X فى الشكل ٢٤ - ١٨ وأتينا ننظر فى اتجاه O أو بمعنى آخر تتجه الموجات إلينا رأسا . ويؤدى العدد الهائل من الموجات المقبلة نحونا الى العدد من المتجهات الكهربائية ذات الإتجاهات العشوائية كما فى شكل ٢٤ - ١٩ أ - حيث لم يرسم عدد أكبر من هذا بكثير من المتجهات المبينة . لو أن الأمواج كانت مستقطبة استوائيا فى مستوى رأسى أى فى مستوى الصفحة فى الشكل ٢٤ - ١٨ (أ) لظهرت المتجهات الكهربائية المتقدمة كما هو مبين فى الشكل ٢٤ - ١٩ ب . أما لو كانت الموجة مستقطبة استوائيا فى مستوى افقى لبدت المتجهات كما فى الشكل ٢٤ - ١٩ ج .

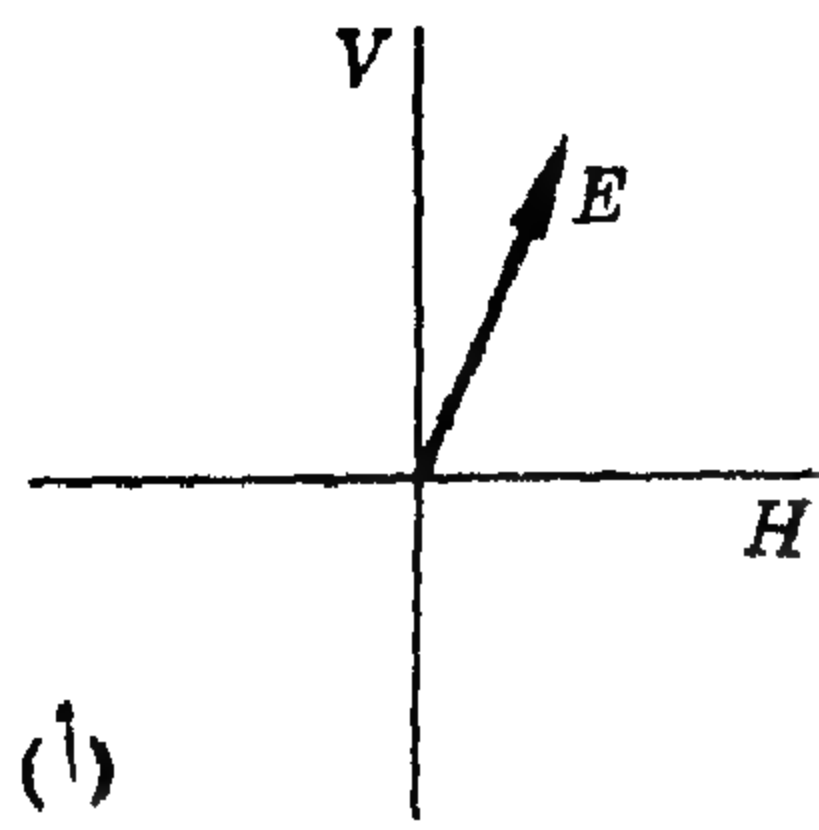


(أ) غير مستقطب

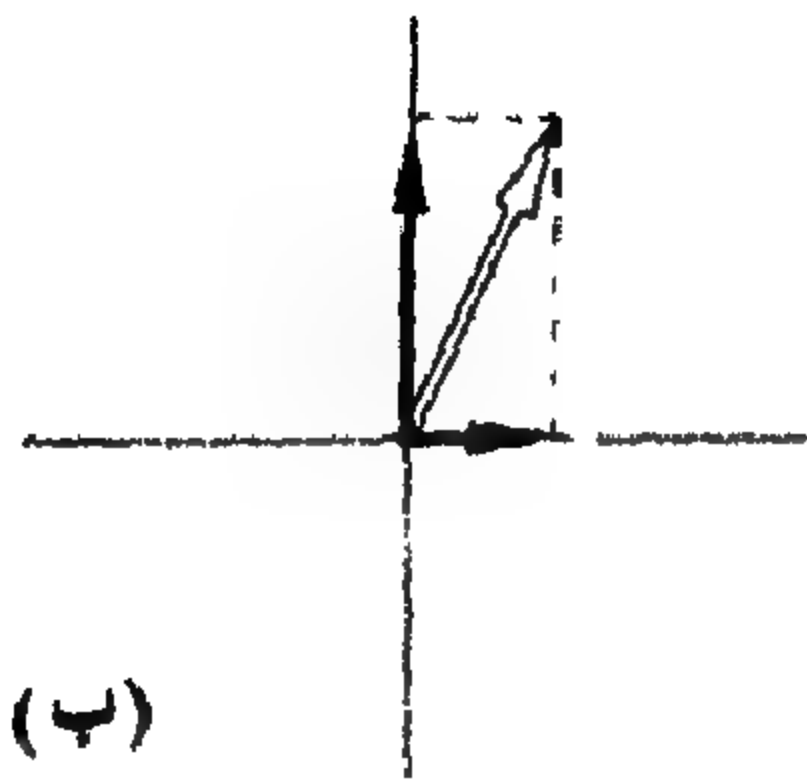
(ب) مستقطب رأسيا

(ج) مستقطب أفقيا

شكل ٢٤ - ١٩
لو أن حزمة من الأشعة
الضوئية تأتى من الصفحة
فإن اهتزازا المجال الكهربائى
سيكون بالنسبة للانواع
الثلاثة من الأشعة كما هو
مبين



(أ)

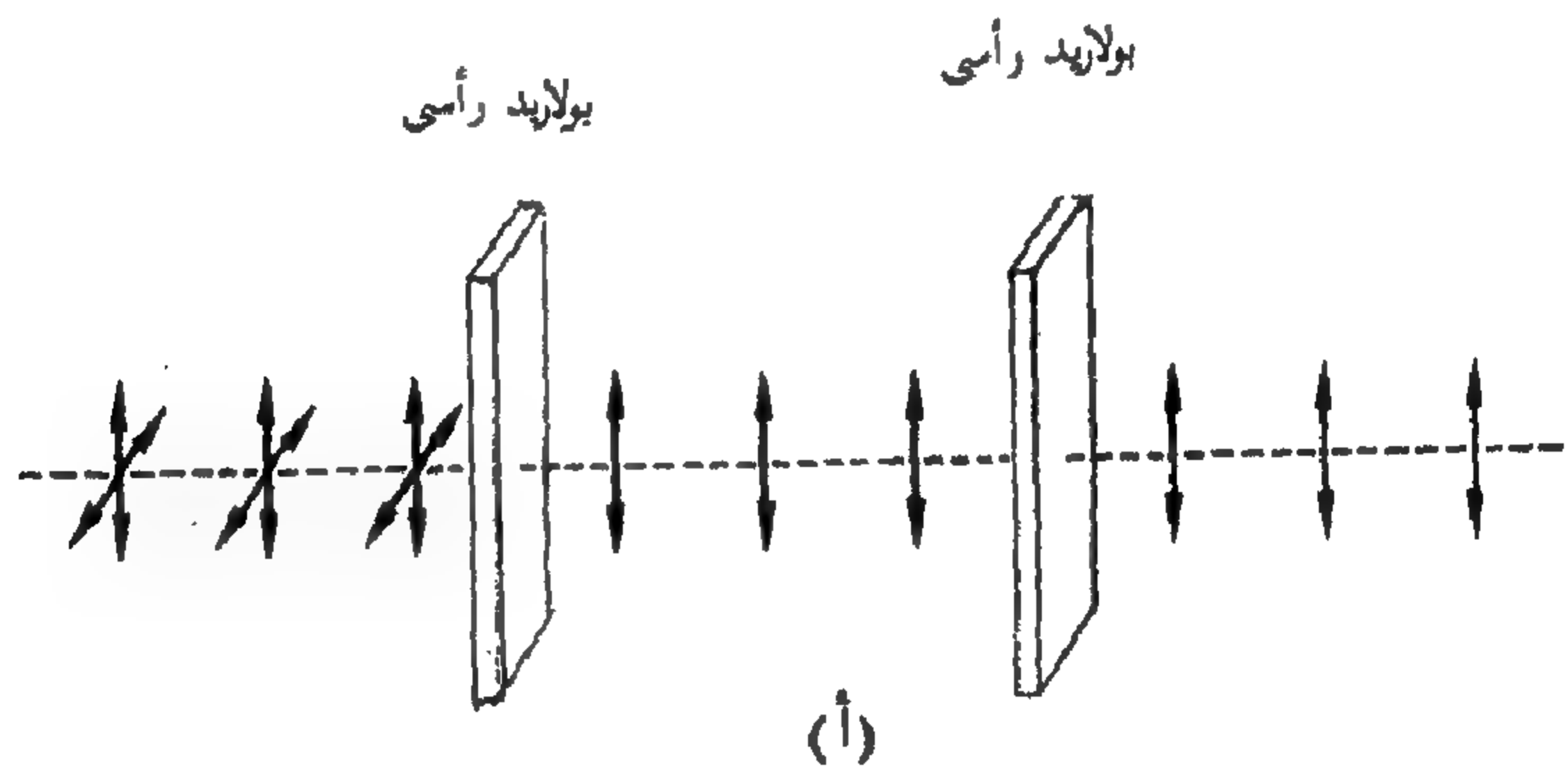


(ب)

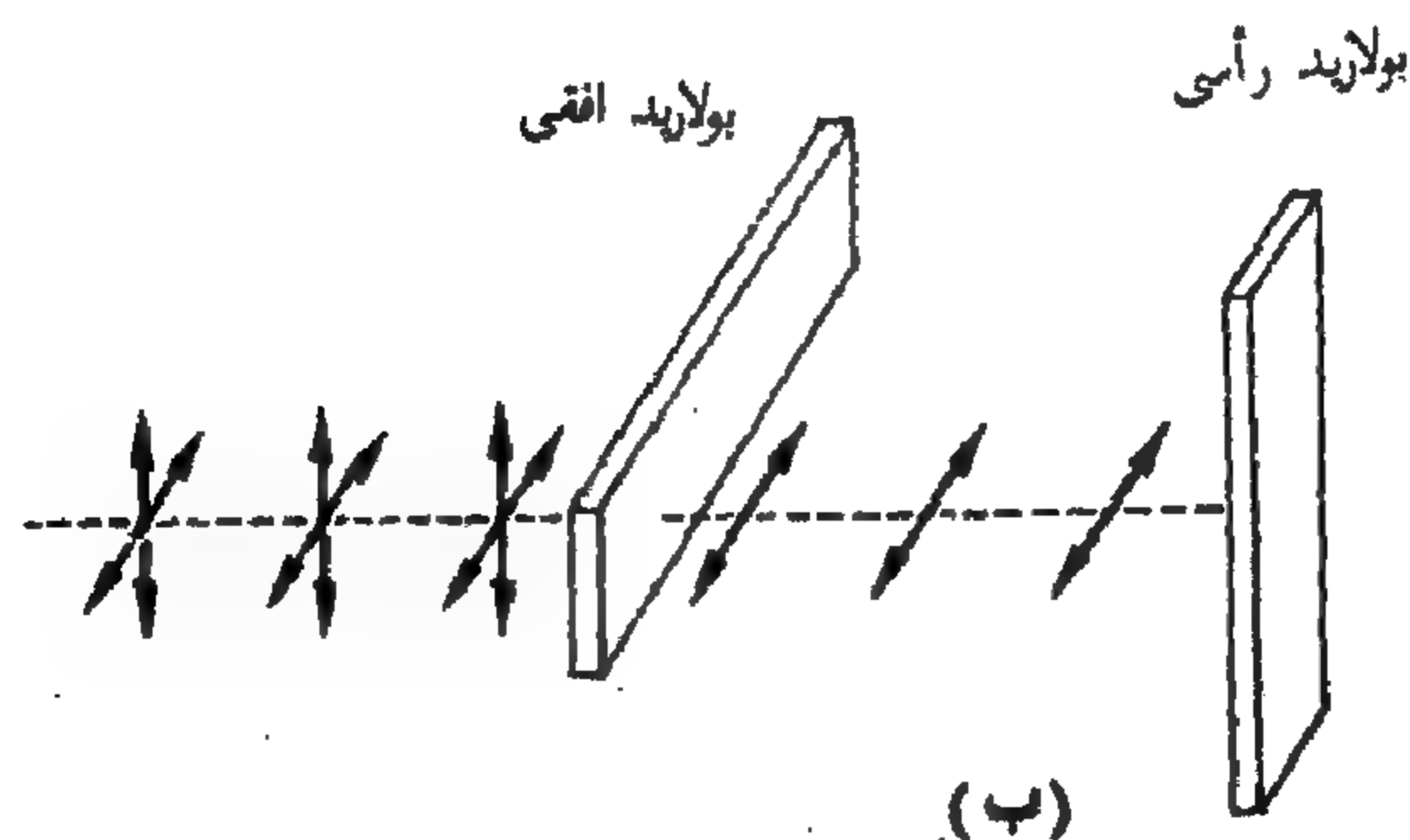
يمكن استقطاب الضوء غير المستقطب استوائيا باستخدام غشاء مستقطب (بولارويد) وهو عبارة عن لوح من البلاستيك الشفاف يحتوى على بللورات إبرية الشكل من مادة كبريتات اليود وكينين، وهذه البللورات مطبورة في اللوح في اتجاهات محددة . ولا يسمح هذا اللوح للضوء بالنفاذ من خلاله إلا اذا كان المتجه الكهربائي يتذبذب في اتجاه معين . ومن ثم لو سقط ضوء غير مستقطب على اللوح فإن الضوء النافذ منه سيكون مستقطب استوائيا وسيكون من مجموع مركبات المتجه الكهربائي الموازية للإتجاه المسموح به . (قبل اختراع البولاريد عام ١٩٢٩ كانت هناك طرق أخرى ولكن نظرا لملائمته ورخص ثمنه فإن البولاريد قد حل مكان جميع تلك الطرق فيما عدا في بعض المواقف الدقيقة جدا) .

يمكن أن يعتبر أى متجه على أنه يتكون من مركبتين متعامدتين ومن ثم لو أن المجال الكهربائي كان اتجاهه كما في الشكل ٢٤ - ٢٠ أ لأمكن تحليله الى مركبتين احدهما رأسية والأخرى أفقية كما في الشكل ٢٤ - ٢٠ ب . ولو مررنا ضوءا يتذبذب بالزاوية الميمنة خلال البولاريد الذى ينفذ في اتجاه رأسى فقط ، فإن المركبة الرأسية للضوء هى فقط التى ستمر خلاله أما المركبة الأفقية فستتوقف .

لنتدبر ما يحدث لو أن ضوء غير مستقطب مر خلال اثنين من البولاريد كما في الشكل ٢٤ - ٢١ سيسمح المستقطب (البوريد) الاول في الجزء (أ) بمرور الذبذبات الرأسية فقط وهذه الذبذبات ستمر خلال المحلل (البولاريد الثانى)



(أ)



(ب)

شكل ٢٤ - ٢٠
يمكن تحليل متجه المجال
الكهربائي الى المركبتين X و Y

شكل ٢٤ - ٢١
يستقطب الضوء غير
المستقطب بواسطة البولاريد
الأول ، المستقطب في الجزء
(ب) يكون البولاريد الثانى ،
المحلل ، والمستقطب
متعامدان ولهذا يوقف الشعاع
تماما بواسطة المحلل

أيضا وذلك لأنه هو الآخر رأسى . ولكن المستقطب فى الجزء (ب) قد أدير خلال 90° بحيث يسمح للذبذبات الأفقية فقط بالمرور ، وهذه الذبذبات ستتوقف تماما بالبولاريد الذى يتجه رأسيا . وعلى هذا (فغالبا) لن يخرج أى ضوء من خلال هذه المجموعة . ويقال فى هذه الحالة الأخيرة أن المحلل والمستقطب متعامدان .

تعريف يستخدم استقطاب الضوء فى كثير من التطبيقات الصناعية والعلمية . وأحد الاستخدامات هو تعيين تركيز المواد ذات الفاعلية البصرية . تقوم المواد ذات الفاعلية البصرية بإدارة مستوى الاستقطاب حين يمر خلالها ضوء مستقطب . فإذا وضع محلول من السكر مثلا بين مستقطب ومحلل متعامدين كما فى الشكل ٢٤ - ٢١ ب ، فإنه يلاحظ أن الضوء لا يتوقف تماما عند المحلل . وعند لف المحلل قليلا بحيث لا يصبح اتجاهه رأسيا نجد أن الضوء قد توقف . لقد أدار محلول السكر الاتجاه الأفقى الأسمى للإستقطاب قليلا نحو الاتجاه الرأسى . وقد وجد أن مقدار دوران مستوى الإستقطاب يعتبر مقياسا مباشرا لتركيز السكر فى المحلول . ومن ثم يمكن قياس تركيز السكر بهذه الطريقة . هناك الكثير من المواد ذات الفاعلية البصرية وتستخدم هذه الفاعلية كمفتاح لتركيب الجزئيات المكونة للمادة . فدوران مستوى الإستقطاب بواسطة الجزئيات أو عدم دورانه يعتمد على الطريقة الدقيقة التى تتواجد بها الذرات فى مواقعها بالنسبة لبعضها البعض فى الجزئىء ، بل إن بعض أنواع السكر توجد على صورتين الأولى تدير مستوى الإستقطاب الى اليسار والأخرى تديره الى اليمين . كلا النوعين من الجزئيات له نفس التركيب الكيميائى ولكن احدهما يعتبر أيسومير للآخر (مشابه له فى التركيب ومختلف معه فى الخواص) ، ويختلف التركيب فقط فى العلاقات الفراغية عند اثنين أو أكثر من مواقع الروابط الكيميائية المتكافئة داخل الجزئىء . هناك الكثير من الأمثلة المبهرة فى الطبيعة على هذه اليمينية واليسارية . فبعض الأنزيمات يستهلك ايسوميرا واحدا لجزئىء ما ويزدهر عليه . وهناك أيضا بعض أنواع البروتين التى تتميز بشكل خاص بتركيبها اليمينى واليسارى عند تكوين اشكالها الحلزونية مما يؤثر كثيرا على سلوكها الفيزيائى .

كثيرا ما ترى تفاصيل الاشياء تحت الميكروسكوب أكثر وضوحا عندما تفحص بين بولارويدين متعامدين . فأجزاء الجسم التى تبدو هى نفسها فى الضوء الطبيعى قد تتباين بشكل كبير فى قدرتها على تغيير استقطاب الضوء النافذ ، ومن ثم تصبح التفاصيل التى لا يمكن تمييزها بأى طريقة أخرى واضحة ومن السهل رؤيتها . حينما يكون جسم شفاف موجودا تحت إجهاد عال فإنه غالبا ما يدير مستوى الاستقطاب للضوء النافذ منه وعلى هذا فإن الجسم الذى يتعرض لإجهادات غير منتظمة سيظهر نطاقات معتمة ومضيئة على التناوب حين يرى بين بولارويدين متعامدين كما فى

الشكل ٢٤ - ٢٢ . وحينما تكون النطاقات متقاربة مع بعضها فإن معنى هذا أن الإجهاد أكثر ما يكون غير منتظم . عند فحص نماذج بلاستيكية لأشياء بها انفعالات كالتي في الشكل ٢٤ - ٢٢ فإنه من الممكن معرفة كيفية توزيع الإجهادات بشكل دقيق . ولهذا الأمر أهمية كبرى عند تصميم الأجزاء المختلفة في الآلات .

شكل ٢٤ - ٢٢

يظهر الجسم الشفاف الذي به انفعالات نطاقات معتمة ومضيئة على التناوب حين يفحص بين بولارويدين متعامدين . ويكون الإجهاد أكبر ما يمكن حين تكون النطاقات أكثر ما تكون تقاربا مع بعضها البعض



قلما ندرك أن الضوء القادم من السماء الزرقاء يكون مستقطبا استوائيا بشكل كبير ولا نتذكر أيضا أن موج الضوء من على سطح بحيرة أو حائط خرساني أبيض مستقطب إلى حد بعيد . (تشكل هذه الحقيقة الأخيرة الأساس للنظارات الشمسية البولارويدية) . ولما كان التعرف على الضوء المستقطب لا يتم إلا باستخدام محلل لذا فأعيننا لا تستطيع إدراك وجوده . ولا شك أن موضوع الضوء المستقطب برمته موضوع شيق وقد ترغب في متابعته بعمق أكبر*

ملخص

تقوم عدسة العين ، في العين البشرية ، بتركيز الصورة على الشبكية . تستطيع العضلات عن طريق تغيير شكل العدسة أن تحضر صور الأجسام الموجودة على مسافات مختلفة على نفس البؤرة . لا يستطيع قصار النظر من الناس أن يركزوا جيدا على الأجسام البعيدة ، في حين أن طوال النظر لا يستطيعون التركيز على الأجسام القريبة جيدا . تحدث اللاستجماتية عندما يكون نظام عدسة العين به تشويه اسطواني . لا تتركز الأشعة المارة خلال الأجزاء الخارجية لعدسات كروية شديدة الانحناء بشكل صحيح . ويسمى هذا العيب الزيغ الكروي . لا تتركز الألوان المختلفة بنفس الدقة بواسطة عدسة ما مما يؤدي إلى ظهور الزيغ اللوني .

قوة العدسة مقاسة بالديوبتر هي مقلوب البعد البؤري مقاسا بالأمتار . حين تكون العدسات على هيئة مجموعات متقاربة فإن قوة المجموعة تساوي مجموع قوى العدسات المنفردة وعلى هذا فإن $1/f = 1/f_1 + 1/f_2$

قوة التكبير لنسيطة ضوئية هي النسبة بين الزاوية خلال المقابلة للجسم عند العين المجردة والزاوية حين يرى الجسم النسيطة . تتيح العدسة المكبرة للإنسان أن يرى جسما حين يكون هذا الجسم على مسافة أقل من النقطة القريبة للعين وتكون قوة تكبيرها التقريبية $(25 \text{ cm})/f$.

في الميكروسكوب البسيط ، تكون العدسة الشيئية صورة حقيقية للجسم ثم ترى هذه الصورة بواسطة العدسة العينية التي تعمل كمكبر .

* هناك كتيب عن هذا الموضوع في سلسلة Momentum Book بعنوان Polarized light ومن تأليف W.A. Shurcliff and S.S. Ballard الناشر هو Princeton, N.J. 1965

تبلغ قوة التكبير لمثل هذا الميكروسكوب $[(18 \text{ cm})/f_o]$ و $[(25 \text{ cm})/f_e]$ وفي الميكروسكوبات الجيدة تكون كل من العدستين ، في الواقع ، مجموعة مركبة من العدسات .

يقوم الاسبيكتروسكوب المنشوري بفصل شعاع من الضوء الى مكوناته من الأطوال الموجية (أو الألوان) فتتكون صورة للدخل الشق لكل طول موجي وتسمى كل صورة بخط من خطوط الطيف وتمثل طولاً موجياً محدداً في شعاع الضوء الأصلي .

يكون الضوء في شعاع ما غير مستقطب عادة ، أى أن متجهه الكهربائي يهتز بصورة مركبة عند كل الزوايا الممكنة عمودياً على اتجاه الشعاع . حينما يمر الضوء غير المستقطب خلال بولارويد فإن الذبذبات التي تحدث في اتجاه واحد فقط هي التي تمر ويسمى هذا الشعاع النافذ - الذى يهتز فيه المتجه الكهربائي دائماً في نفس الاتجاه - شعاعاً مستقطباً . تملك المواد ذات الفاعلية البصرية - القدرة على تغيير اتجاه استقطاب شعاع ما حين يمر هذا الشعاع من خلالها .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادراً على عمل الآتي :

- ١ - أن ترسم الملامح الرئيسية للعين وأن تشرح وظيفة كل منها .
- ٢ - أن تشرح ما المقصود بقصر النظر (myopia) وطول النظر (hyperopia) ولا استجماتية (astigmatism) وكذا فقد القدرة على التكيف . أن تذكر كيف يمكن علاج كل من هذه العيوب باستعمال العدسات . أن تحل مسائل شبيهة بالأمثلة التوضيحية ٢٤ - ١ و ٢٤ - ٢ .
- ٣ - أن ترسم تركيب آلة التصوير البسيطة وأن تشرح كيف يتم تركيز الصورة في آلة التصوير ذات العدسة المتحركة .
- ٤ - أن تعطى معنى الزينج الكروي والزينج اللوني .
- ٥ - أن تعرف وحدة ديوبتر . أن توجد البعد البؤري لعدة عدسات رقيقة على شكل مجموعة متقاربة .
- ٦ - أن تشرح عمل عدسة التكبير وبالإشارة إليها أن تعطى معنى قوة التكبير . أن تذكر قوة التكبير التقريبية لعدسة مجمعة معينة .
- ٧ - أن توضح كيف يعمل الميكروسكوب ذو العدستين وذلك برسم نظامه البصري وكذا مسار الشعاع له . أن تميز بين العدسة الشيئية والعدسة العينية .
- ٨ - أن ترسم النظام البصري لتلسكوب فلكي وأن تحدد موقع الصورة التي ينتجها .
- ٩ - أن تشرح ما المقصود باسبيكتروسكوب منشوري وأن توضح كيف يقوم بإنتاج صور خطية . أن تصف كيف يفصل الألوان بتحليل شعاع من الضوء .
- ١٠ - أن تميز بين الضوء غير المستقطب والضوء المستقطب . أن تشرح كيف يمكن إنتاج ضوء مستقطب . أن تعرف المصطلحات التالية : بولارويد ، بولارويدان متعامدان ، المواد ذات الفاعلية البصرية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادراً على تعريف أو شرح كل من :

- أجزاء العين ، الحدقة ، إنسان العين ، القرنية ، العدسة ، الشبكية .
- قصر النظر ، طول النظر ، اللانستجماتية ، فقدان القدرة على التكيف .
- النقطة القريبة ، النقطة البعيدة .
- الزينج الكروي ، والزينج اللوني .
- قوة عدسة مابالديوبتر
- قوة التكبير
- الشيئية ، العينية
- سبيكتروسكوب منشوري ، خط الطيف

الضوء المستقطب في مقابل غير المستقطب ، مستوى الاستقطاب .
بولارويدا متعامدان ، مواد ذات فاعلية بصرية .

أسئلة وتخمينات

- ٢ - إثبت أن الصورة التي تتكون بواسطة عدسة مجمعة لرجل ما تكون مقلوبة ولكن هذا الرجل وصورته سيكون لهما نفس اليد اليمنى .
إثبت أن العكس تماما هو الذى يحدث عند استخدام مرآة مستوية .
- ٢ - تنتج صور أوضح في الأجهزة البصرية فقط عندما تستخدم أجزاء صغيرة من العدسة . وفي حالة آلة التصوير ذات الثقب لا حاجة بها لعدسة ، لتوضيح إمكانية هذا إرسم جسما صغيرا مضيئا ارتفاعه حوالى 1 mm ويقع على بعد 10 cm من فتحة قدرها 1 cm موجودة في حائل ضخم معمم . بين كيف أن البقعة المضيئة التي يسببها الجسم على سائر يقع خلف الفتحة بمقدار 5 cm تتضاءل في الحجم كلما كانت الفتحة أضيق . بين انه في الحالة القصوى حين تصير الفتحة كثقب الابرّة فان جسمين يبعدان عن بعضهما 1 cm ويقع كل منهما على بعد 10 cm من الفتحة سيؤديان الى صور محددة المعالم على الساتر .
- ٣ - بين لماذا يؤدي ثقب صغير موضوع أمام عدسة الى صورة جيدة حتى لو لم تكن الصورة في البؤرة تماما .
(ارجع الى السؤال ٢)
- ٤ - على الرغم من أن كل آلات التصوير ذات 35 mm تبدو متشابهة إلا أن أثمانها تتراوح بين 20 \$ الى عدة مئات من الدولارات مع العلم بأنها جميعا تحتوى على نفس الملحقات . ما هي أوجه اختلاف هذه الآلات ؟
- ٥ - يحرف منشور زجاجى شعاعا من الضوء الأزرق أكثر مما يحرف شعاعا احمر الى حد ما . بين بواسطة صدور الموجة كيف تقودنا هذه الحقيقة الى استنتاج ان الضوء الاحمر ينتقل بسرعة اكبر خلال الزجاج .
- ٦ - أى هذه الآلات - حين يستعمل بطريقة عادية - يكون صورا حقيقية : (أ) العين ، (ب) آلة التصوير ، (ج) الميكروسكوب ، (د) التلسكوب الأرضى (هـ) منظار ثنائى العينية ، (و) فانوس الإسقاط ، (ز) المرآة المستوية ، (ح) مرآة الحلاقة المقعرة ، (ط) مرآة المكشاف الضوئى ؟
- ٧ - تسمى الأطوال الموجية للضوء الصادر من بخار الزئبق الساخن خطوط الطيف . لإشرح بوضوح لماذا تسمى خطوطا .
- ٨ - يمكن للإنسان أن يشترى ميكروسكوبا رخيصا لكى يستعمله الاطفال ، ولكن الصور التي ترى بهذا الميكروسكوب تكون دائما وأبدا ذات حواف ملونة . لماذا ؟
- ٩ - افترض أن آلة تصوير صندوقية قد ملئت بالماء وأن عدستها قد جعلت أقوى بحيث تتكون الصورة في نفس موقعها من الفيلم . هل يمكن أن تتغير الصور التي تلتقط بهذه الآلة على أى نحو ؟ كرر المسألة لو أن لدينا صندوقا ذا ثقب ضيق وليس عدسة .
- ١٠ - لماذا كانت « سرعة » آلة التصوير هامة . ماهى عوامل التصميم المختلفة التي تؤثر على السرعة ؟ (اعتبر كلا من سرعة القفل وسرعة العدسة)
- ١١ - ماذا يحدث للطاقة الضوئية التي لا تنفذ من البولارويد حين يسقط عليه ضوء غير مستقطب ؟ هل يمكنك أن تفكر في العيوب التي تظهر نتيجة لهذا عند استخدام البولارويد ؟
- ١٢ - كيف يمكن تحديد ما إذا كان شعاع من الضوء مستقطب أم لا ؟ وما اذا كان مكونا من شعاعين أحدهما مستقطب والآخر غير ذلك .
- ١٣ - عند استخدام آلة تصوير تجارية قطر فتحة عدستها 5 mm وهو ما يسمى قطر الفتحة ، وجد أن الزمن المناسب للتعرض كان 1/60 s ما هو الزمن التقريبى للتعويض حين تستخدم آلة تصوير ذات ثقب قطره 0.5 mm وبها فيلم من نفس النوع : (ق) .
- ١٤ - أتاحت لك أنبوبة بريد اسطوانية طويلة مصنوعة من الورق المقوى وعدستان بعداهما البؤريان 60 cm و 10 cm يمكن تثبيتهما في الأنبوبة . استخدم هذه الاشياء في تصميم تلسكوب لعبة .

مسائل

- ١ - (أ) عندما يضبط نظام العين - العدسة ليرى جسما بعيدا فما هو البعد البؤرى للعدسة ؟ افترض أن المسافة بين عدسة العين والشبكية هي 2.0 cm . (ب) كرر المسألة حين يكون الجسم المراد رؤيته يقع عند النقطة القريبة أى على بعد 25 cm من العين .
- ٢ - جسم طوله 0.01 cm يرى بالعين المجردة عندما يكون عند النقطة القريبة لها ، أى 25 cm ما هو طول الصورة المتكبرة على الشبكية ؟ (باعتبار أن المسافة بين عدسة العين والشبكية هي 1.0 cm) كرر المسألة عند استعمال عدسة مكبرة بعدها البؤرى 5.0 cm بحيث وضع الجسم قريبا من نقطتها البؤرية .
- ٣ - تستطيع سيدة أن ترى الكتابة بوضوح حين يكون الكتاب على بعد 60 cm وليس أقرب من ذلك من عينها (أ) هل هي قصيرة النظر أم طويلته ؟ (ب) ما هو نوع العدسة وبعدها البؤرى والتي يجب عليها استعمالها لتصحيح نظرها ؟
- ٤ - لا يستطيع شخص ما أن يرى الأجسام بوضوح اذا لم تكن أقرب من حوالى 150 cm (أ) هل هو قصير النظر أم طويله ؟ (ب) ما هو نوع العدسة وبعدها البؤرى والتي يجب عليه استعمالها لتصحيح نظره ؟
- ٥* - ترتدى فتاة صغيرة نظارة ذات عدسات سميكة أشبه بالعدسات المكبرة . حين أمسك اخوها بهذه النظارة في الشمس ليحصل بها على صور وجد أن كل عدسة تعطى صورة للشمس على بعد 30 cm من العدسة . ما هي النقطة القريبة والنقطة البعيدة المحتملين بالنسبة للفتاة بدون استعمال النظارة ؟
- ٦ - لاحظ مدرس أحد الأطفال في الفصل يمسك الصفحات قريبا جدا من عينيه عند القراءة . والوضع العادى لهذا الطفل كان 11.0cm (أ) الطفل قصير النظر ام طويله ؟ (ب) ما هو نوع العدسة وبعدها البؤرى والتي يجب على الطفل استعمالها في نظارته ؟
- ٧ - وجد أحد أخصائى قياس البصر أن الشخص الذى يقوم بفحصه يستطيع أن يرى أحسن ما يمكن حين يثبت أمام عينية مجموعة مكونة من ثلاث عدسات الواحدة وراء الأخرى وأبعادها البؤرية هي 20 cm و 50 cm و 100 cm - ما هو البعد البؤرى الذى يجب وضعه للشخص ؟
- ٨ - لو أن المسافة بين العدسة والفيلم كانت 10.0 cm في آلة تصوير ذات عدسة واحدة ولو أنها تلتقط صورا مساحتها 8 × 6 cm فما هي المسافة التى يجب وضع آلة التصوير عندها لكي تلتقط صورة لوحة مساحتها 100 cm² بحيث تنضبط اللوحة داخل الصورة تماما ؟
- ٩ - عند استخدام آلة التصوير التى ذكرت في المسألة 8 لتصوير شجرة من مسافة 40 m فإن صورة الشجرة يكون طولها 2.0 cm ما هو ارتفاع الشجرة ؟
- ١٠ - في آلة تصوير صندوقية بسيطة كانت المسافة بين العدسة والفيلم هي 10 cm لو أن البعد البؤرى للعدسة كان 9.5 cm فأين يجب وضع جسم ما للحصول على أحسن صورة له على الفيلم ؟
- ١١ - اوجد (أ) القوة (ب) البعد البؤرى للعدسات التالية حين توضع لتكوين مجموعة مقاربة

$$f_1 = 20 \text{ cm}, f_2 = -60 \text{ cm}, f_3 = 40 \text{ cm}$$
- ١٢ - ما هو البعد البؤرى لعدسة يلزم أن تكون ملاصقة تماما لعدسة مجمعة 50 cm حتى تكونا معا عدسة مفرقة بعدها البؤرى 100 cm
- ١٤ - في ميكروسكوب بسيط ، كان البعد البؤرى للشيئية 3 cm بينما كان البعد البؤرى للعينية 5 cm ما هي قوة تكبير الميكروسكوب ؟
- ١٥* - صنع صبي ميكروسكوبا بسيطا بثنيت عدسة بعدها البؤرى 5 cm عند طرف أنبوبة طولها 10 cm وثنيت عدسة أخرى بعدها البؤرى 3.0 cm عند الطرف الآخر للأنبوبة . (أ) إذا استخدم العدسة ذات 3.0 cm كعدسة عينية فأين بالتقريب يجب عليه وضع العينية التى يفحصها أمام الشيئية (ب) ما هي بالتقريب قوة تكبير هذا الميكروسكوب ؟
- ١٦ - ما هي قوة تكبير التلسكوب الفلكى الذى تبلغ قوة عدسته الشيئية 1.5 diopter وعدسته العينية 20 diopter
- ١٧ - يبلغ البعد البؤرى للعدسة الشيئية في تلسكوب بمرصد « يركز » حوالى 19 m عند رصد القمر ما هو عدد الكيلومترات على سطح القمر التى تناظر طولاً قدره 1.0 cm على الصورة التى تكونها العدسة الشيئية ؟ (المسافة الى القمر = $3.8 \times 10^8 \text{ m}$)
- ١٨ - (أ) كم مرة يجب أن تزيد شدة الإستضاءة في تلسكوب اذا تغير قطر العدسة الشيئية من 0.5 cm الى 4.0 cm (افترض أن الأبعاد الأخرى ظلت ثابتة) . افترض الآن - كبديل - أن البعد البؤرى للشيئية قد ضوعف ثلاث مرات عند الانتقال من العدسة الصغيرة الى العدسة الكبيرة ، (ب) كم عدد المرات التى تتغير بها شدة الإستضاءة عند نقطة معينة بالصورة ؟

- ١٩*** - اعتبر زاوية رأس المنشور أو الزاوية عند قمة المنشور مساوية 60° في الشكل ٢٤ - ١٤ . إذا كانت $n = 1.50$ وكانت زاوية السقوط 53° فاوجد (أ) الزاوية التي يغادر بها الشعاع المنشور ، (ب) زاوية الانحراف D
- ٢٠* - يحتوي جهاز ما على عدسة بعدها البؤرى 48 cm ومصنوعة من زجاج معامل انكساره $n = 1.50$ ولكي تبرد العدسة وجد أنه من المفيد غمر الجزء المحتوى على العدسة في وعاء على شكل متوازي مستطيلات به ماء - ما هو البعد البؤرى لعدسة من نفس نوع الزجاج يجب لصقها مع العدسة الأولى حتي يعمل الجهاز بشكل صحيح ؟

الفصل الخامس والعشرون

التداخل والحيود

ناقشنا في الفصلين الأخيرين سلوك العدسات والمرايا باستخدام مفهوم الأشعة الضوئية . وفي هذه المناقشات لم نكن في حاجة الى معرفة ما إذا كان الضوء يتكون من جسيمات أو موجات . ولكن هذا ليس صحيحا بالنسبة للموضوعات التي سوف نعالجها في هذا الفصل . وسنرى أن طبيعة الضوء تسبب ظواهر تداخل تشبه في نواح كثيرة ظواهر التداخل التي قابلناها في دراستنا للحركة الموجية والصوت . وقد أدى مجرد وجود هذه الظواهر ، وكذلك بعض الظواهر الأخرى التي سوف نناقشها في هذا الفصل الى قبول الطبيعة الموجية للضوء بشكل نهائى كما سوف نرى .

٢٥ - ١ الحيود

تستطيع الموجات أن تنحني حول الأركان ، وتسمى هذه الظاهرة بالحيود . ويمكن توضيح هذه الحقيقة بصريا بسهولة باستخدام موجات الماء كما هو مبين في الشكل ٢٥ - ١ . لاحظ كيف تمر الموجات خلال الفتحة الموجودة في الحاجز ثم تنتشر في كل المنطقة الواقعة خلفه . ويشاهد مثل هذا الموقف في حالة الموجات الصوتية التي تستطيع أيضا أن تنحني حول الأركان . وبالمثل فإن الموجات الكهرومغناطيسية يمكنها أن تنتشر في المنطقة الواقعة خلف عائق . وسوف نرى مؤخرا في هذا الفصل أن الضوء يمتاز بنفس هذه الخاصية .

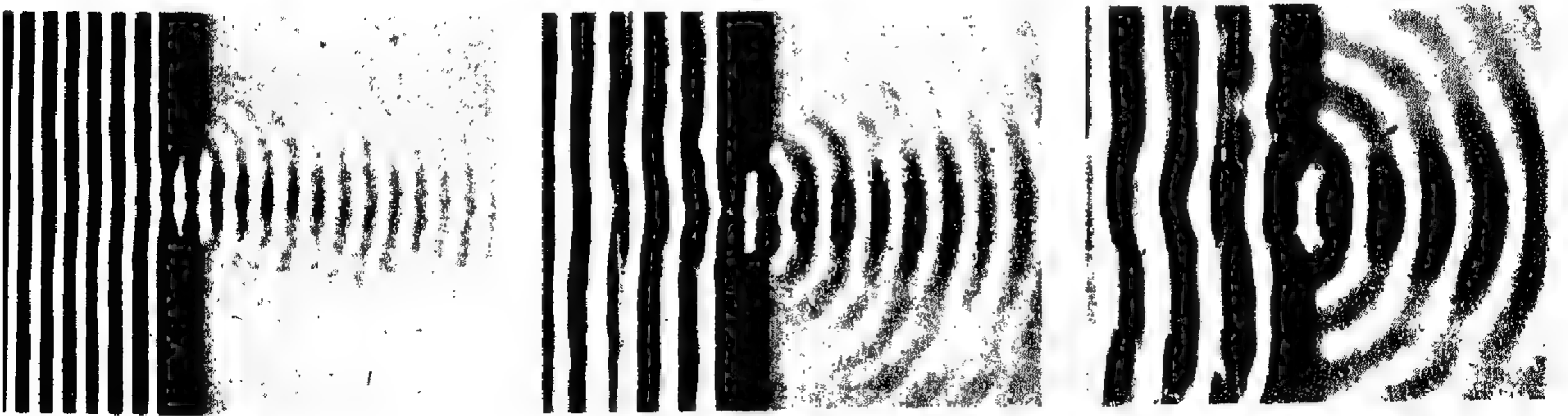
والمبدأ الأساسي لظاهرة الحيود هو حقيقة أن الموجات يمكن أن تتداخل كل منها مع الأخرى . ولكي نعد أنفسنا لمناقشة الحيود بأسلوب موضوعي سوف ندرس أولا كيف تتداخل الموجات .

٢٥ - ٢ تداخل الموجات

قد تذكر أننا قد أثبتنا عند دراستنا للموجات الصوتية أن من الممكن أن نجعلها تتداخل كل منها مع الأخرى . وعلى وجه التخصيص يمكننا تقسيم شعاع واحد من الموجات الصوتية الى نصفين وذلك بإرسال كل منهما في واحدة من أنبوتين . وإذا اتحدت هاتان الموجتان مرة أخرى فإنها قد تقوى أو تلاشى كل منها الأخرى ، ويعتمد ذلك على الطول النسبي للأنبوتين .

لنفرض أن لدينا مصدرين للموجات عند النقطتين A و B في الشكل ٢٥ - ٢ أ ، وأن هذين المصدرين يبعثان موجات متماثلة (ومتناسكة) * . وعمليا يمكننا استخدام الموجات المنبعثة من مصدر واحد وتقسيمها الى جزئين لكي نتأكد أن

شكل (٢٥ - ١)
تسقط موجات الماء على فتحة من اليسار . لاحظ الموجات تنتشر من الفتحة المنطقة الواقعة أمام الفتحة . تنتشر في جميع اتجاهات تملأ كل هذه طاقة إذا كان الطول الموجي ارضا بحجم الفتحة .

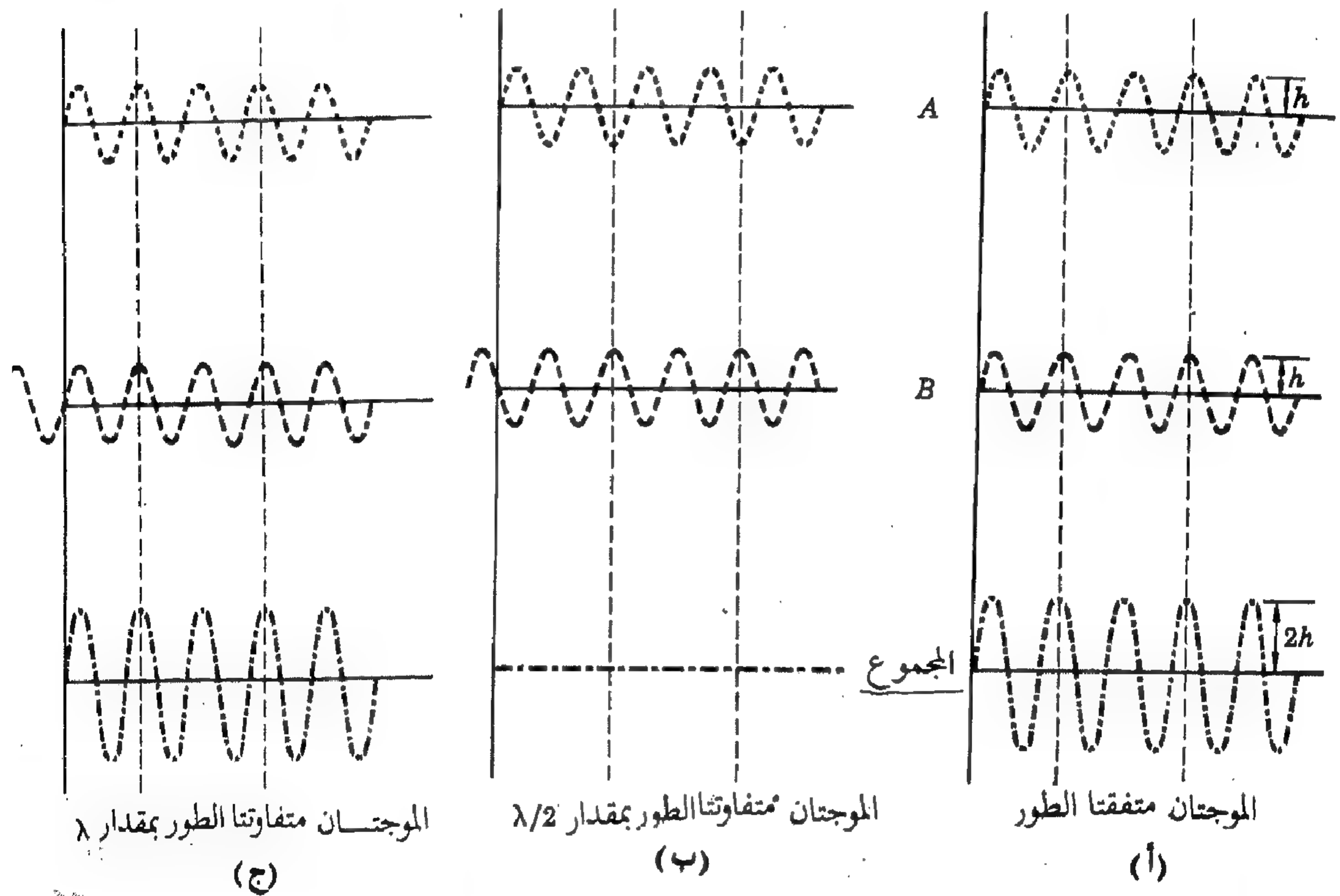


انظر الجزء (٢٧ - ١٣) لمناقشات أخرى عن التماسك

الموجات متماثلة في الشكل . ومن الواضح أنه إذا اتحدت الموجتان A و B في الشكل ٢٥ - ٢ فإن سويهما فإنهما سوف تقوى كل منهما الأخرى لأنهما متفقتا الطور . وفي هذه الحالة تجمع قمم الموجة A على قمم الموجة B منتجة قمما كبيرة كما هو مبين بالنسبة الى « مجموع الموجة في الجزء أ . وتسمى هذه الحالة التي تجمعت فيها موجتان بحيث تقوى كل منهما الأخرى بالتداخل البناء .

شكل (٢٥ - ٢)
تستطيع الموجات المتماثلة أن تقوى أو تلاشى كل منها الأخرى ويعتمد ذلك على أطوارها النسبية .

وإذا حركنا المصدر B الى الخلف مسافة نصف طول موجي كما هو مبين في الشكل ٢٥ - ٢ ب فإننا سنرى أن الموقف مختلف تماما . والآن اذا جمعنا الموجتين فإن قمة الموجة A سوف تجمع على قرار الموجة B . نتيجة لذلك فإن الموجتين A و B سوف تلاشى كل منهما الأخرى اذا كانتا أصلا متساويتين في المقدار . ويوضح الجزء ب مجموع هاتين الموجتين المتفاوتتين الطور بمقدار 180° أو $\lambda/2$.



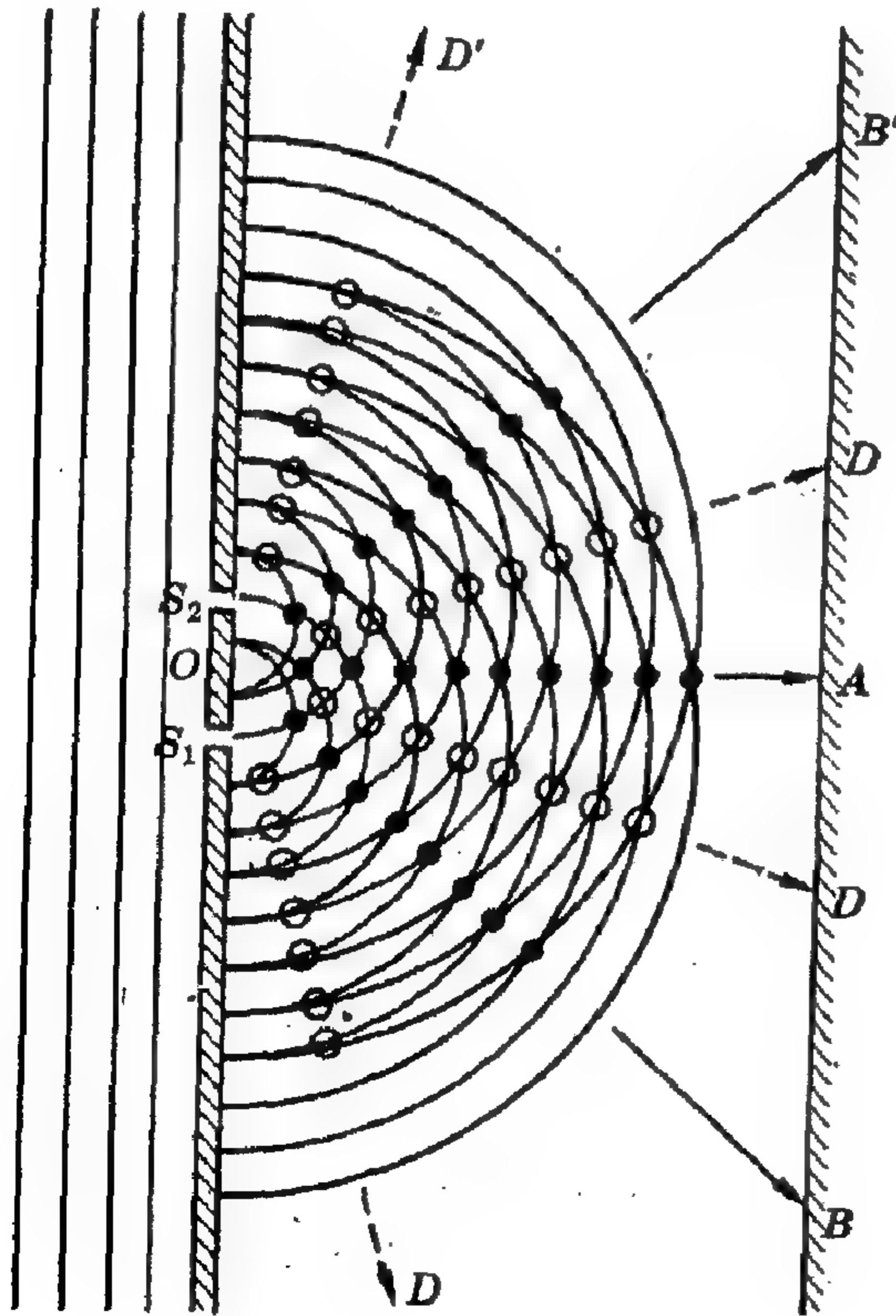
وكما نرى فإن مجموع الموجتين يساوى صفرا ، وهذه هي حالة التداخل (الإتلافي) الكلي . وفي التداخل الإتلافي تلاشى كل من الموجتين الأخرى تماما عندما يجمعان معا .

وإذا أرجعنا الموجة B الى الخلف بمقدار نصف طول موجي آخر فانها ستكون متأخرة عن الموجة A بمقدار 360° أو طول موجي كامل كما هو مبين في الشكل

٢٥ - ٢ ح . وهنا تتحد الموجتان تماما في الخطوة مرة ثانية ، بحيث اذا جمعنا سويا فإنهما سوف تقويان كل منهما الأخرى كما هو مبين في الجزء ح . من هذا التحليل يتضح لنا أن الموجات المتفاوتة الطور بمقدار 0° ، 360° ، $(360^\circ) (2) \dots$ الخ تميل الى أن تقوى كل منها الأخرى . أو ، كما ينص عادة ، اذا كان فرق المسار بين الموجات يساوى 0 ، λ ، 2λ ، $3\lambda \dots$ الخ فإنها تقوى كل منها الأخرى .

بالمثل ، يحدث الموقف المين في الجزء ب من الشكل إذا كانت الموجة B متأخرة عن الموجة A بمقدار $\lambda + \frac{1}{2}\lambda$. ويحدث التلاشي إذا كان فرق المسار يساوى $n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$ حيث $n = 1, 2, 3 \dots$. وهذا يعنى أن التداخل الإلتافى يحدث إذا كان فرق المسار هو $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$ الخ

يمثل الشكل ٢٥ - ٣ رسما تخطيطيا لتجربة بسيطة توضح تداخل موجات الماء . وفي هذه التجربة تسقط موجات الماء المستوية على الحائط من اليسار ، ويسمى الشقان S_1 و S_2 الموجودان بالحائط للموجات بالمرور خلالها عند هاتين النقطتين . وعليه فإن الشقين يعملان كمصدرين جديدين للموجات بالنسبة للمنطقة التي تقع على يمين الحائط . ويلاحظ أن هذين المصدرين يولدان موجتين مترابطتين لأنهما



شكل (٢٥ - ٣)
تسقط الموجات المستوية
على الشقين من اليسار .
وتمثل قمم الموجات بالنقط
الداكنة ، بينما تمثل بطونها
بالنقط الفاتحة ويحدث هذان
الشقان بقمم موجات جديدة
كما هو مبين . وتقوى الموجتان
كل منهما الأخرى على طول
الخطوط المارة بالنقط
المصمتة ، بينما تلاشي كل
منهما الأخرى على طول
الخطوط المارة بالنقط
المفتوحة .

تنتجان من نفس الموجة الساقطة وتمثل بعض قمم الموجات الدائرية المنبعثة من S_1 و S_2 في الشكل باللون الأسود

لاحظ أن قمم الموجات المنبعثة من المصدرين متفقة الطور وتقوى كل منها الأخرى عند النقط الداكنة المبينة على الخطوط OA ، OB ، OB' .. الخ في الشكل ٢٥ - ٣ وتوجد قرارات الموجات في منتصف المسافة بين كل قمتين متتاليتين ، وهي أيضا تقوى كل منهما الأخرى على نفس الخطوط عند النقط الموضحة بالنقط الفاتحة في الشكل ٢٥ - ٣ وكما نرى تتداخل الموجتان المنبعثتان من المصدرين سويا تداخلا بناءا على الخطوط OA ، OB ، OB' ... الخ . ولهذا فإن سعة الموجات التي تصطدم مع الحائط الأيمن عند النقط A ، B ، B' .. الخ تكون كبيرة سوف تكون هذه النقط مناظرة لبطن الموجات .

وعند فحص الشكل ٢٥ - ٣ بتفصيل أكثر سنرى أن الموجتين تلاشي كل منهما الأخرى عند نقط معينة تقع على الخطين OD ، OD' . وعند مواضع الدوائر المفتوحة تلتقي قمة من أحد المصدرين مع قرار من المصدر الآخر وتلاشي كل منهما الأخرى . وحيث أن إزاحة سطح الماء على الخطين OD و OD' تساوي صفرا ، فإن نقطتي تقاطع هذين الخطين مع الحائط الأيمن هما عقدتان . لذلك لن توجد أية حركة موجية عند النقط المرموز لها بالرمز D ، ومن السهل إثبات أن هذه النقط هي دائما نقط حركة صفرية (هل يمكنك أن تبرهن هذه الحقيقة ؟) .

لإثبات هذا السلوك بطريقة أوضح من ذلك تأمل التجربة المبينة في الشكل ٢٥ - ٤ . وفي هذه التجربة تنبعث موجات الماء من مصدرين مترابطين ، ويحدث هذا بواسطة الشقين S_1 و S_2 . وكما نرى من الشكل ، تؤدي هاتان المجموعتان من الموجات الى ظهور مناطق اضطراب كبير واضطراب صغير على سطح الماء .

٢٥ - ٣ تجربة الشق المزدوج ليونج

ليست التجربة التي وضعت في الجزء السابق ، والتي تبحث في تداخل الموجات المترابطة المنبعثة من شقين ، خاصة بموجات الماء فقط . ومن الضروري هنا أن نتذكر أن شعبتي الشبكة الرنانة يمكنها أن تحدث تداخل الموجات الصوتية . ويمكن تفسير هذه الظاهرة بطريقة مشابهة لوصف موجات الماء المتداخلة ، باستثناء أن الموجات في هذه الحالة هي الموجات الصوتية التضاغية وليست موجات الماء المستعرضة . ومن الضروري أن يكون واضحا أن أية مجموعة مترابطة من الموجات يمكنها أن تصور ظواهر التداخل .

شكل (٢٥ - ٤)
يعت المصدران بموجات
ماء مترابطة تشبه كثيرا تلك
الموجات المنبعثة من الشقين
في الشكل ٢٥ - ٣

"PSSC Physics," 3d ed., D.C.
Heath and Company, 1965.)

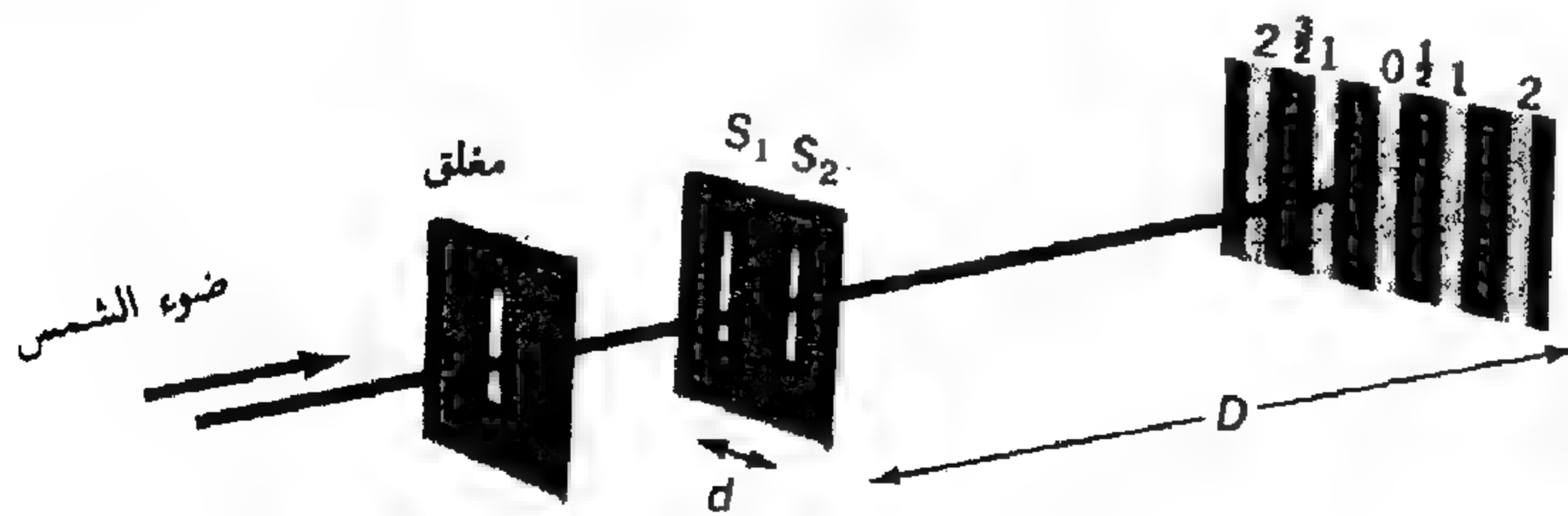


وكما ذكرنا سابقا ، كان نيوتن يعتقد أن الضوء ذو طبيعة جسيمية . وقد صور الضوء على أنه تيارا من الجسيمات المنطلقة من المصادر الضوئية . وبالطبع فإن هذه الجسيمات تسير في خطوط مستقيمة كما تفعل كرات البيسبول . وبالرغم من أن جريمالدي كان قد أثبت منذ زمن بعيد في عام ١٦٦٠ أن الضوء يمكن أن يحيد ، أى ينحني حول الأجسام ، إلا أن نيوتن استطاع أن يستنبط تفسيراً لهذه الحقيقة بدلالة جسيمات الضوئية . ولكن تفسيره لم يكن مرضياً جداً ، وبالرغم من ذلك فإن الناس قد قبلوا آراءه عن طبيعة الضوء ، ولم تقبل الطبيعة الموجية للضوء على نطاق واسع إلا بعد عام ١٨٠٣ .

وفي عامي ١٨٠٣ و ١٨٠٧ نشر توماس يونج نتائج تجاربه التي توضح ظاهرة التداخل الضوئي . وقد استخدم يونج في هذه التجارب شعاعاً ضيقاً من ضوء الشمس ينفذ خلال فتحة في مغلق نافذة ليسقط بعد ذلك على شقين ضيقين متوازيين في قطعة من الورق المقوى في وجود ستار على الجانب الأيمن من الشقين كما هو موضح في الشكل ٢٥ - ٥ . وعندئذ لاحظ يونج ظهور بقع ساطعة ومظلمة متبادلة على الستار كما هو مبين . وهذا يذكر كثيراً بالعقد والبطون التي تشاهد عند مرور الموجات المترابطة خلال شقين .

ومن الواضح أنه إذا كان الضوء موجياً في طبيعته فإن الموجات المنبعثة من الشقين S_1 و S_2 في الشكل ٢٥ - ٥ سوف تتداخل مع بعضهما البعض . ولهذا فإن الموجتين المنبعثتين من المصدرين لابد أن تكونا متفقتي الطور عند أى من نقط السطوع على الستار . وحيث أن المصدرين منشطين بواسطة نفس الموجة المستوية الساقطة أساساً ، فإن المصدرين سيبعثان بموجتين متفقتي الطور . نظراً لأن المسافة بين كل من المصدرين S_1 و S_2 والنقطة O متساويتين ، فإن الموجتين اللتين تصلان من المصدرين S_1 و S_2 إلى النقطة O تقطعان نفس المسافة . وعليه فإنهما سوف تقويان كل منهما الأخرى وبذلك ستكون O بطن ضوئى ، أى بقعة ساطعة .

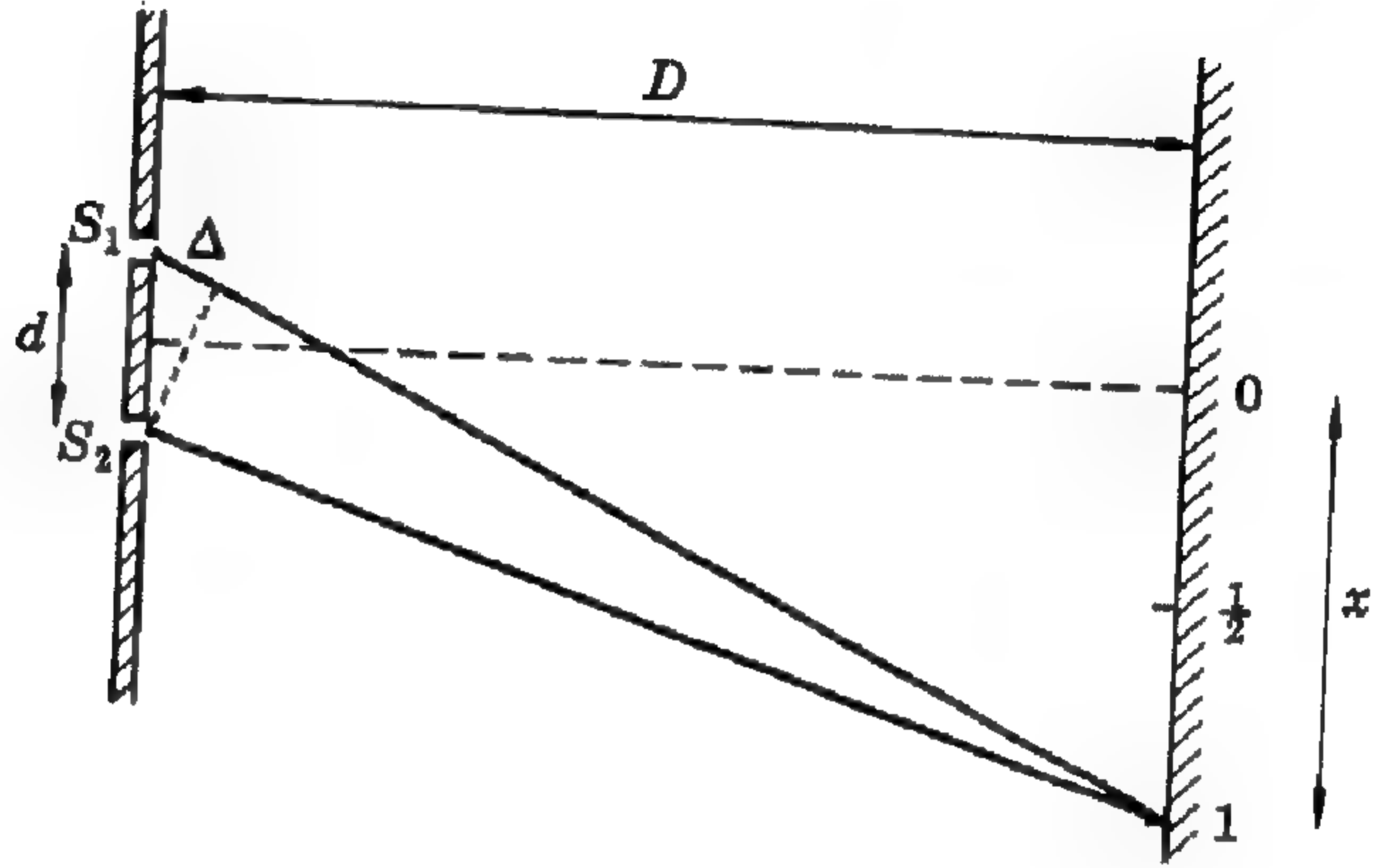
ولكى نحصل على البقعة الساطعة 1 على كل من جانبي البقعة الساطعة المركزية (أو النهاية العظمى) ، لابد أن تكون الموجتان المنبعثتان من S_1 و S_2 متفقتي



شكل (٢٥ - ٥)
يعمل الشقان S_1 و S_2 كمصدرين مترابطين . وفي حالة الموجات الضوئية تكون المسافة بين هذب التداخل عادة مساوية لبضع ملليمترات قارن هذا الشكل بالشكل ٢٥ - ٤ لموجات الماء .

الطور مرة ثانية . ويوضح الشكل ٢٥ - ٦ الموقف عند احدى هذه النقط .
(عمليا يجب أن يكون انفصال الشقين d مساويا كسرا من المليمتر فقط ، بينما
يجب أن تكون D مساوية مترا أو قريبا من ذلك . ولكننا شوهدنا الهندسة الحقيقية
للكل حتى تظهر المسافات واضحة) .

واضح من الشكل أن الضوء المنبعث من S_1 لابد أن يقطع مسافة أطول من تلك
التي يقطعها الضوء المنبعث من S_2 بمقدار Δ . وما سبق ذكره يجب أن يكون مفهوما
أن الموجتين سوف تقويان كل منهما الأخرى عندما تساوى Δ طولاً موجياً واحداً .



شكل (٢٥ - ٦)
عندما يكون الفرق في المسار
 λ مساويا للطول الموجي Δ
تقوى الموجتان كل منهما
الأخرى ويشاهد سطوع .

وإذا كانت Δ تساوى طولاً موجياً واحداً فإن الموجات الضوئية التي تصل إلى 1
من S_1 ستكون متأخرة بمقدار طول موجي كامل بالمقارنة بالضوء المنبعث من S_2 .
وكما هو مبين في الشكل ٢٥ - ٢ ح ، فإن هاتين الموجتين سوف تقويان إذن كل
منهما الأخرى ، وبذلك ستكون النقطة 1 نقطة ساطعة . بالإضافة إلى ذلك ، فلكي
تصل الموجتان إلى النقطة 1/2 لابد أن تقطع الموجة المنبعثة من S_1 مسافة أطول من
تلك التي تقطعها الموجة المنبعثة من S_2 بمقدار $\frac{1}{2}\lambda$. وهكذا فإن الموجتين تلتاشى
كل منهما الأخرى عند النقطة 1/2 وينتج عن ذلك بقعة مظلمة . بالمثل فإن Δ عند
النقطة 3/2 في الشكل ٢٥ - ٥ ستساوى $\frac{3}{2}\lambda$ ، وعليه فإن الموجتين ستلتاشى كل
منهما الأخرى أيضا . ومع ذلك فإن $\Delta = 2\lambda$ عند النقطة 2 ، وينتج عن ذلك تقوية
(سطوع) .

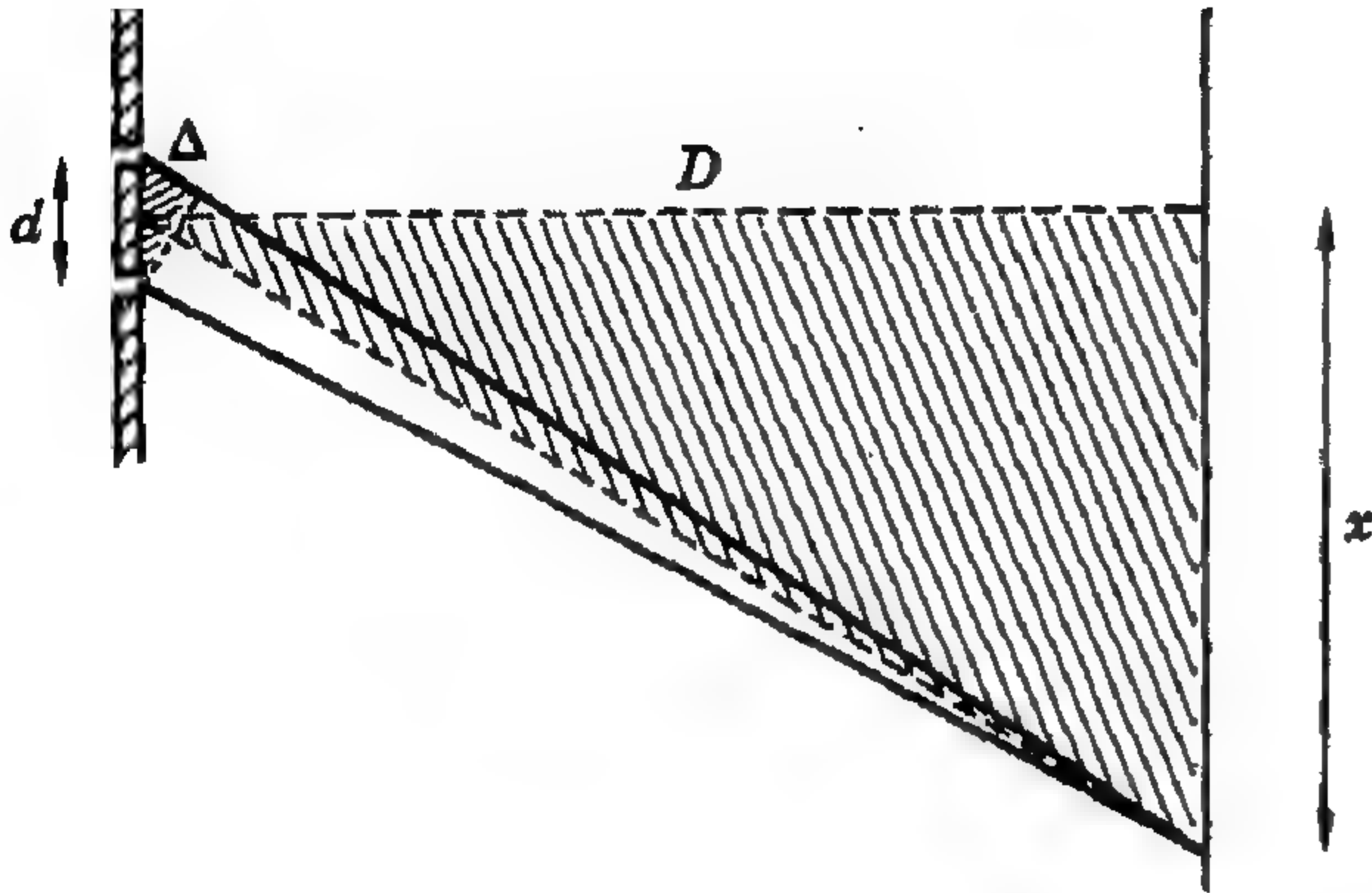
لنشتق الآن العلاقة بين هندسة الشق وطبيعة الضوء وموضع البقع الساطعة
بالاستعانة بالشكل ٢٥ - ٧ . نذكر مما سبق أن d أصغر كثيرا جدا من D ، لذلك
فإن المثلثين المظللين متشابهان تقريبا . علاوة على ذلك فإن وتر المثلث الكبير يساوى
 D تقريبا لأن x صغيرة بالمقارنة بالمسافة D . لذلك .

$$\frac{\Delta}{d} \approx \frac{x}{D} \quad (٢٥ - ١)$$

وهذه هي المعادلة الأساسية في تجربة الشق المزدوج ليوينج .

وإذا كانت x في الشكل ٢٥ - ٧ هي المسافة بين البقعة المركزية الساطعة وبقعة ساطعة جانبية ، فإن Δ يجب أن تكون λ أو 2λ أو 3λ .. الخ . وعموماً فإن Δ للبقة الساطعة رقم n من البقعة الساطعة الصفيرة الموجودة عند المركز تعطى بالعلاقة .

$$\Delta = n\lambda$$



شكل (٢٥ - ٧)
حيث أن المسافة D أكبر
كثيراً من d و x عملياً فإن
حقيقة أن المثلثين المثلثين
مماثلين تعطيان
 $\Delta/d = x/D$

أما إذا كانت x هي المسافة بين البقعة الساطعة المركزية وبقعة مظلمة ، فإن Δ يجب أن تساوي $\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ ، $5\lambda/2$... الخ للبقع المظلمة الأولى والثانية والثالثة... الخ من المركز .

مثال توضيحي ٢٥ - ١

في إحدى تجارب الشق المزدوج استخدم الضوء الأصفر المنبعث من القوس الصوديومي بدلاً من ضوء الشمس . وكانت هندسة التجربة كالتالي :

$D = 100 \text{ cm}$ ، $x = 0.50 \text{ cm}$ ، $d = 0.023 \text{ cm}$ حيث x هي المسافة بين البقعة الساطعة المركزية والنهاية العظمى ذات الرتبة الثانية ، أي البقعة 2 في الشكل ٢٥ - ٥* . اوجد الطول الموجي لضوء الصوديوم .

طريقة الحل . باستخدام المعادلة (٢٥ - ١) وتذكر أن $\Delta = 2\lambda$ للبقة الساطعة ذات الرتبة الثانية نجد أن :

$$\frac{2\lambda}{d} = \frac{x}{D}$$

أو :

$$\lambda = \frac{(\frac{1}{2})(0.023 \text{ cm})(0.50 \text{ cm})}{100 \text{ cm}} = 5.8 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

* رقم رتبة البقعة الساطعة (الرتبة الصفيرة ، الأولى ، الثانية ... الخ) يساوي الفرق بين عددي الأطوال الموجية في المسارين المتتبعين من الشقين المتجاورين إلى البقعة الساطعة المعنية . وحيث أن طول المسارين المتتبعين من الشقين إلى البقعة الساطعة المركزية متماثلان ، فيقال أن البقعة أو الهدبة الساطعة المركزية هي الهدبة ذات الرتبة الصفيرة .

وهي قيمة قريبة من القيمة المقبولة للطول الموجي لضوء الصوديوم الأصفر ، وبالتحديد 5890\AA لاحظ أن الأطوال الموجية للضوء صغيرة للغاية . وقد كان يونج أول من قاس الأطوال الموجية للضوء مستخدماً هذه الطريقة .

٢٥ - ٤ أنماط التداخل

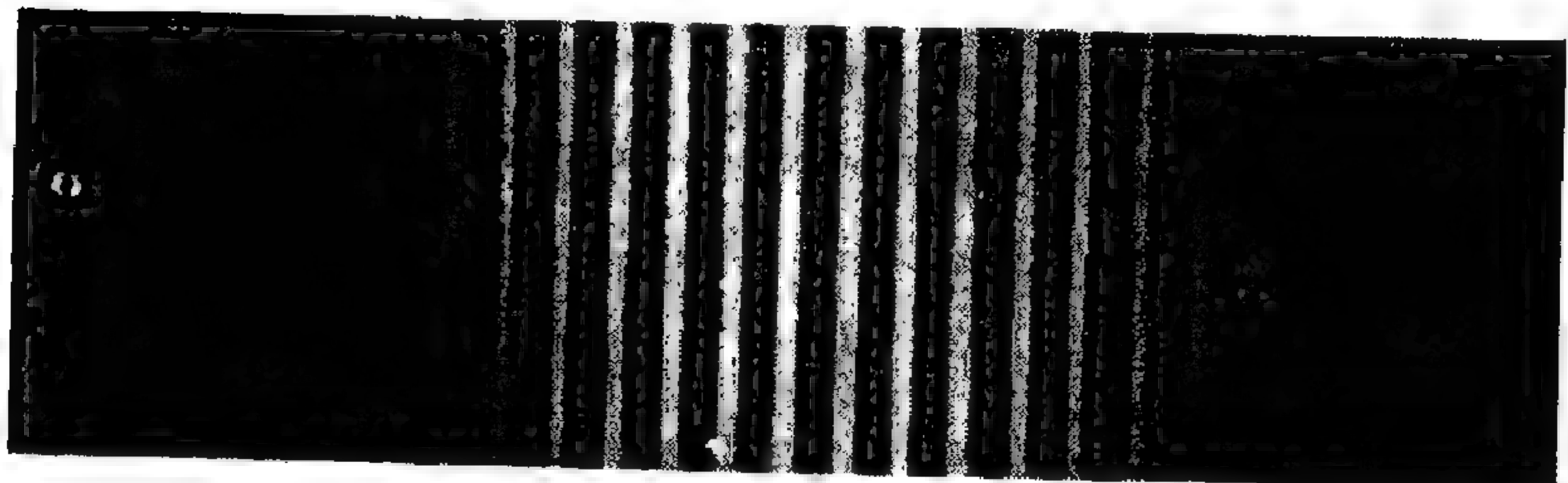
رأينا في الجزء السابق أن من الممكن استخدام شقين متوازيين للحصول على شرائط أو هدب تداخل ساطعة ومظلمة متبادلة على الستار ، ويمثل الشكل ٢٥ - ٨ نمط تداخل نموذجي لتجربة الشق المزدوج ليونج باستخدام ضوء أحادي اللون (أو أحادي الطول الموجي) . ويمكن تسجيل هذا النظام الهدبي باستبدال الستار في الشكل ٢٥ - ٧ بلوح فوتوغرافي . لاحظ أن المسافة بين كل هدبتين متتاليتين ثابتة وأن النهاية العظمى ذات الرتبة الصفرية ، أي الهدبة المركزية ، أكثر الهدب شدة .

ويمثل الجزء السفلي من الشكل ٢٥ - ٨ رسماً تخطيطياً لشدة الضوء في نمط التداخل . ومن الممكن حساب الطول الموجي للضوء أحادي اللون باستخدام صورة فوتوغرافية كتلك الموضحة في الشكل ٢٥ - ٨ وذلك باستخدام المعادلة (٢٥ - ١) ، حيث x في هذه المعادلة هي المسافة بين مركز الهدبة ذات الرتبة الصفرية ومركز الهدبة المعنية . من المعادلة (٢٥ - ١) نجد أن :

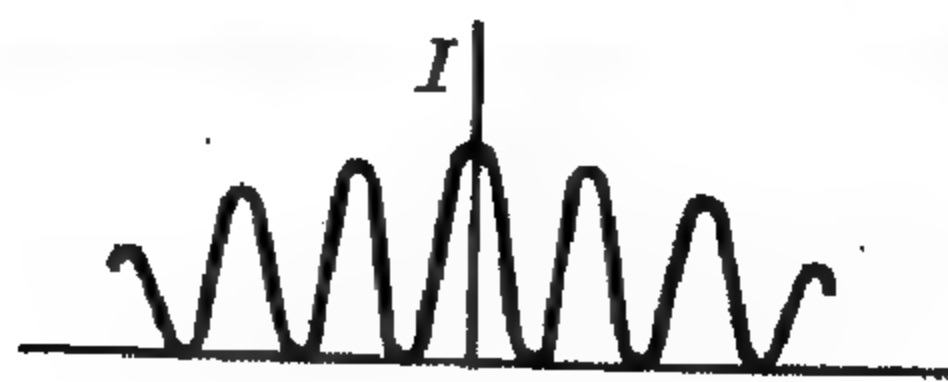
$$x = \frac{D}{d} n \lambda$$

حيث n هي رقم رتبة الهدبة الساطعة المعنية ، أي الرقم المبين فوق الهدبة في الشكل ٢٥ - ٨ . ويلاحظ من الوصلة الأولى أن تباعد الهدب يكون أكثر اتساعاً إذا كانت المسافة بين الشقين d صغيرة . وبالتبع كلما زادت المسافة بين الشقين والستار D كلما زاد انفصال الهدب .

4 3 2 1 0 1 2 3 4



شكل (٢٥ - ٨)
هدب التداخل المتكونة
بواسطة الشق المزدوج
(After Jenkins and White.)



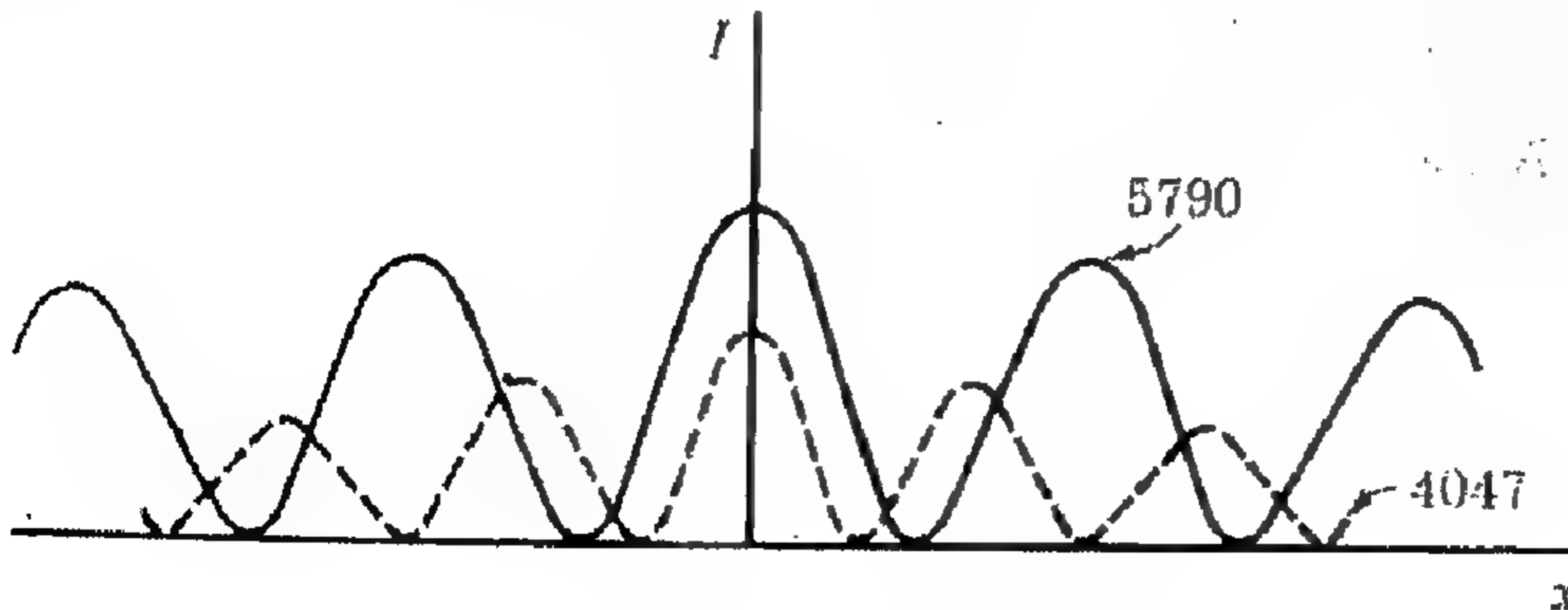
يلاحظ من معادلة X أن انفصال الهدب يعتمد أيضا على الطول الموجي للضوء . وعند إضاءة الشقين بالضوء الأصفر المنبعث من القوس الصوتيومي يجب أن نراعى أن هذا الضوء يتكون كلية تقريبا من طولين موجيين هما 5890 Å و 5896 Å . ونظرا لأن هذين الطولين الموجيين متقاربان جدا فإن هدبها تتطابق تقريبا . لهذا فإن الشكل ٢٥ - ٨ سيكون مناسباً لهذه الحالة .

ومع ذلك فإن الضوء المنبعث من المصباح الزئبقي المزرق يتكون من عدة ألوان كما هو موضح في اللوحة الملونة . ويتكون هذا الضوء أساساً من أربعة أطوال موجية هي الأصفر (5790 Å) والأصفر المخضر (5461 Å) والأزرق (4358 Å) والبنفسجي (4047 Å) . فإذا استخدمنا هذا الضوء في تجربة الشق المزدوج ستتكون على الستار أربع مجموعات من الهدب ، واحدة لكل لون . ويعطى انفصال الهدب بالعلاقة التالية .

$$x = \frac{D}{d} n \lambda$$

ولكى نوضح تأثير هذا التعقيد ، اعتبر نمطى التداخل الناتجين من الطولين الموجيين 5790 Å و 4047 Å : يوضح الشكل ٢٥ - ٩ نمط شدة الضوء لمجموعتي الهدب ، حيث يمثل المنحنى المستمر الهدب الصفراء بينما يمثل المنحنى المقطع الهدب البنفسجية .

ويجب أن يكون واضحاً من الشكل ٢٥ - ٩ أنه في حالة الضوء المتكون من أكثر من طول موجي واحد لا تتطابق هدب التداخل للألوان المختلفة على بعضها البعض وقد لاحظ يونج ذلك لأنه كان يستخدم ضوء الشمس في تجاربه . وكما هو واضح من اللوحة الملونة ، يتكون ضوء الشمس من جميع الألوان . لهذا فإن الهدب التي شاهدها يونج كانت ملونة بدرجة عالية . وملاحظة مواضع الألوان في نمط التداخل استطاع يونج أن يثبت أن اللون الأحمر أطول الألوان في الطول الموجي وأن اللون البنفسجي أقصرها في الطول الموجي . وبالطبع فإن قياساته للطول الموجي لم تكن دقيقة جداً لأن هذه الهدب الملونة عريضة ومنتشرة . وحتى عند استعمال الضوء أحادي اللون تكون الهدب عريضة بدرجة ملحوظة كما هو مبين في الشكل



شكل (٢٥ - ٩)
عندما يضاء الشق المزدوج
بطولين موجيين في نفس
الوقت يتكون نمط تداخل
متميزان واحد لكل لون .

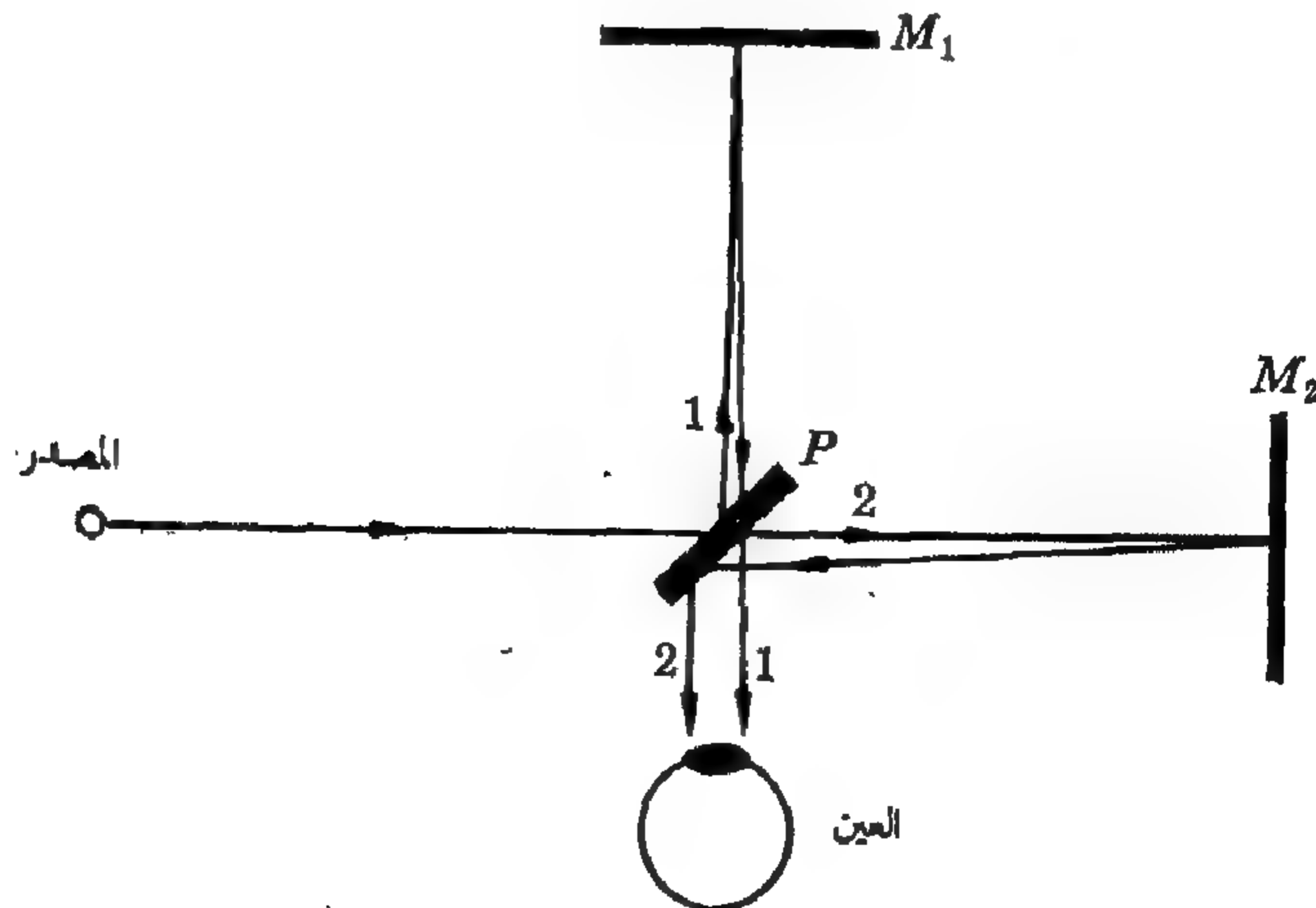
٢٥ - ٨ . ولزيادة الدقة في قياس الأطوال الموجية يجب استخدام محزوز الحيود الذى يتكون من آلاف الشقوق كما سنرى في جزء لاحق .

٢٥ - ٥ مقياس التداخل لمايكلسون

يعتبر التداخل بين شعاعين ضوئيين متسقين أساس إحدى الطرق العالية الدقة لقياس الأطوال . ويمثل الشكل ٢٥ - ١٠ رسماً تخطيطياً ومبسّطاً لمقياس التداخل لمايكلسون . يقسم الضوء المنبعث من مصدر أحادى اللون إلى قسمين بواسطة مرآة شبه شفافة P . ويعكس حوالى نصف الشعاع إلى أعلى إلى المرآة M_1 ثم يرتد ثانية إلى P كما هو مبين . أما النصف الآخر فإنه ينفذ إلى المرآة M_2 ثم ينعكس راجعاً إلى P ، حيث ينعكس إلى أسفل كما هو مبين . (وبالطبع هناك أشعة منعكسة أخرى ، ولكن ما يهمنا هما الشعاعان المبينان) .

وإذا قطع الشعاع ١ نفس المسافة التى يقطعها الشعاع ٢ فإن الشعاعين سيكونان متفقان في الطور عند دخولهما عين المشاهد ، وفي هذه الحالة سيمرى المشاهد سطوعاً . لنفرض الآن أن المرآة M_2 قد تحركت مسافة قدرها $\lambda/4$ إلى اليمين . وحيث أن الشعاع ٢ يجب أن يقطع هذه المسافة مرتين (ذهاباً وإياباً) فإنه سيقطع الآن مسافة قدرها $\lambda/2$ أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع ١ وعندما يتحد الشعاعان سوياً في العين سوف يلاشى كل منهما الآخر لأنهما متفاوتا المسار بمقدار $\lambda/2$. عندئذ سيمرى المشاهد ظلاماً .

علاوة على ذلك إذا حركت المرآة M_2 مسافة متساوية أخرى قدرها $\lambda/4$ إلى اليمين فإن الشعاع ٢ سوف يقطع في هذه الحالة مسافة قدرها λ أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع ١ . نتيجة لذلك ستقوى كل من الموجتين الأخرى ، وعندئذ يشاهد السطوع مرة أخرى . وواضح أنه عندما تستمر المرآة M_2 في الحركة ببطء إلى اليمين يتبادل ظهور السطوع والأظلام تباعاً وهذا ما يراه المشاهد . وكلما تحركت المرآة



شكل (٢٥ - ١٠)
في مقياس التداخل لمايكلسون
يقطع نصفاً الشعاع مسارين
مختلفين ، ولهذا فإنهما يمكن
أن يتداخل كل مع الآخر

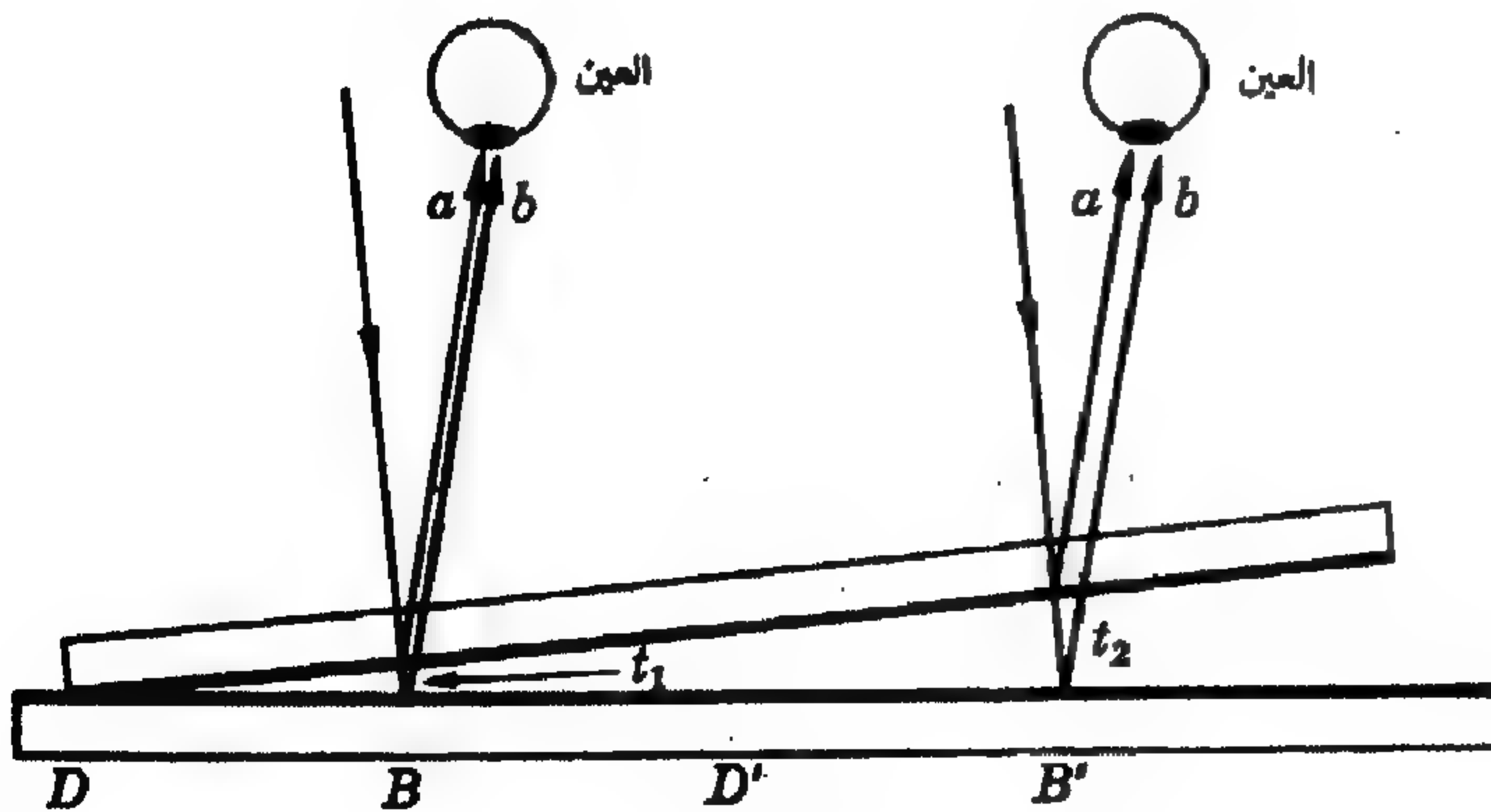
مسافة قدرها $\lambda/2$ تترك الهدبة الساطعة مكانها للظلام ثم يعود السطوع مرة أخرى .
 وإذا كان عدد الهدب الساطعة التي تظهر للمشاهد عند حركة المرآة M_2 ببطء إلى
 اليمين هو 1000 فإن ذلك يعني أن المرآة قد تحركت مسافة قدرها $1000(\lambda/2)$

نرى من ذلك اذن أن من السهل قياس المسافة التي تتحركها المرآة M_2 بدقة
 قدرها $\lambda/2$. وحيث أن λ قد تكون $4 \times 10^{-5} \text{ cm}$ للضوء الأزرق ، من الممكن قياس
 الحركات الضئيلة التي تصل إلى 0.00002 cm . وفي الحقيقة فإن هذا الجهاز يمكن
 أن يستخدم لقياس أطوال بدقة تصل إلى واحد من مائة من هذه القيمة باستخدام
 أساليب تقنية خاصة . وبالرغم من أننا قد أفرطنا في تبسيط النمط الذي يراه المشاهد
 بدرجة كبيرة ، فإن هذا الجهاز بسيط جدا . وهذا الجهاز ذو قيمة كبيرة ليس فقط
 في قياس الأطوال بدقة كبيرة ، ولكن يمكن استخدامه أيضا لقياس معامل انكسار
 الغازات .

٢٥ - ٦ التداخل الناتج من الأغشية الرقيقة

تنشأ الألوان الجميلة المنعكسة من غشاء رقيق من الزيت المنتشر على
 سطح بركة صغيرة من الماء ، وكذلك المظهر الملون لفقاعة الصابون في
 الضوء الساطع نتيجة للتداخل الضوئي الذي يحدثه الغشاء الرقيق .
 وسندرس الآن كيف تنشأ هدب التداخل هذه وكيف يمكن استخدامها لقياس
 مسافة صغيرة .

نفرض أن لدينا لوحين زجاجيين يحصران بينهما سفينا هوائيا كما هو مبين في الشكل
 ٢٥ - ١١ وفي الحقيقة يجب أن تكون الزاوية بين اللوحين أصغر مما هو مبين . وإذا
 أضىء اللوحان من أعلى بضوء أحادي اللون فإن مشاهدا ينظر إلى اللوحين من أعلى
 سوف يرى هدبا مظلمة وساطعة متبادلة كما هو موضح بالحرفين D و B في
 الشكل .



شكل (٢٥ - ١١)
 الشعاعان المنعكسان من
 سطحي السفين الهوائى يمكن
 أن يتداخلا كل مع الآخر .
 هذا الرسم تخطيطى فقط
 (فى أى وجه يعتبر الرسم
 غير صحيح ؟)

وتتكون هذه الهدب نتيجة لتداخل الشعاعين المنعكسين من السطحين العلوي والسفلي للسفين الهوائى كما هو مبين بالشعاعين a و b فى الشكل ٢٥ - ١١ . وعندما يرى السطوع عند B يكون الشعاعان إما متفقى الطور أو متفاوئى الطور بمقدار عدد صحيح من الأطوال الموجية . وعندما تنتقل من الهدب B إلى B' نكون قد أحرنا الشعاع b بمقدار طول موجى واحد كامل . وقد حققنا ذلك بأن جعلنا الشعاع b عند B' يقطع مسافة قدرها $2(t_2 - t_1)$ أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع b عند B . (ونحن نهمل الزاوية الصغيرة التى تصنعها الأشعة مع الرأسى) . لهذا فإننا نرى أن السمك قد تغير بمقدار $\lambda/2$ عند الانتقال من هدبة ساطعة إلى الهدبة التالية فى السفين الهوائى . (المسافة هى $\lambda/2$ وليست λ لأن الشعاع يقطع المسافة الزائدة مرتين ، إلى أسفل ثم إلى أعلى) . بالمثل فإن الهدب المظلمة تتكون كلما تغير السمك بمقدار $\lambda/2$.

وعند استخدام الضوء الأبيض أو عديد اللون فى هذا النوع من التجارب تقوى الألوان المختلفة فى أماكن مختلفة . نتيجة لذلك تكون الهدب ملونة بدرجة عالية ، وهو ما يشاهد عادة فى فقاعات الصابون وأغشية الزيت فى ضوء الشمس . (هل يمكنك أن تثبت أن الهدب الزرقاء أكثر تقارباً من بعضها من الهدب الحمراء ؟)

إذا ملئ السفين المبين فى شكل ٢٥ - ١١ بسائل بدلا من الفراغ (أو الهواء كتقريب جيد) ، فإن الشعاع b سيتأخر أكثر بالمقارنة بالشعاع a . وحيث أن سرعة الضوء فى سائل معامل انكساره n هى c/n ، فإن الشعاع سيحتاج إلى زمن أطول لقطع مسافة معينة فى السائل بالمقارنة بالزمن اللازم لقطع نفس المسافة فى الفراغ . وفى خلال الزمن الذى يقطع فيه الشعاع مسافة d فى السائل يمكنه أن يقطع مسافة قدرها nd فى الفراغ . لهذا السبب إذا قطع الضوء مسافة d فى مادة معامل انكسارها n فإننا نقول أن طول المسار الضوئى المكافئ فى هذه المادة هو nd . وكما ترى فإن الشعاع b فى الشكل ٢٥ - ١١ سوف يقطع مسافة قدرها (n) مضروبة فى ضعف السمك أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع a .

طول المسار الضوئى

ناقشنا فيما سبق حالة سفين ملئى بالهواء . وفى هذه الحالة $n = 1.00$ ، وعليه فإن فرق المسار الضوئى بين الشعاعين b و a هو ببساطة ضعف السمك . ومع ذلك فإذا كان السفين مملوءا بسائل معامل انكساره n . فإن فرق المسار سيكون (n) مضروبا فى ضعف السمك . وعليه فإذا كانت t_1 ، t_2 تقابلان بقعتين ساطعتين متجاورتين فإن :

$$2(t_2 - t_1)n = \lambda$$

وهذا يعنى بالالفاظ أن التغير في السمك بين هدتين ساطعتين متتاليتين هو $\frac{\lambda}{n}$ بدلا من $\frac{\lambda}{2}$.

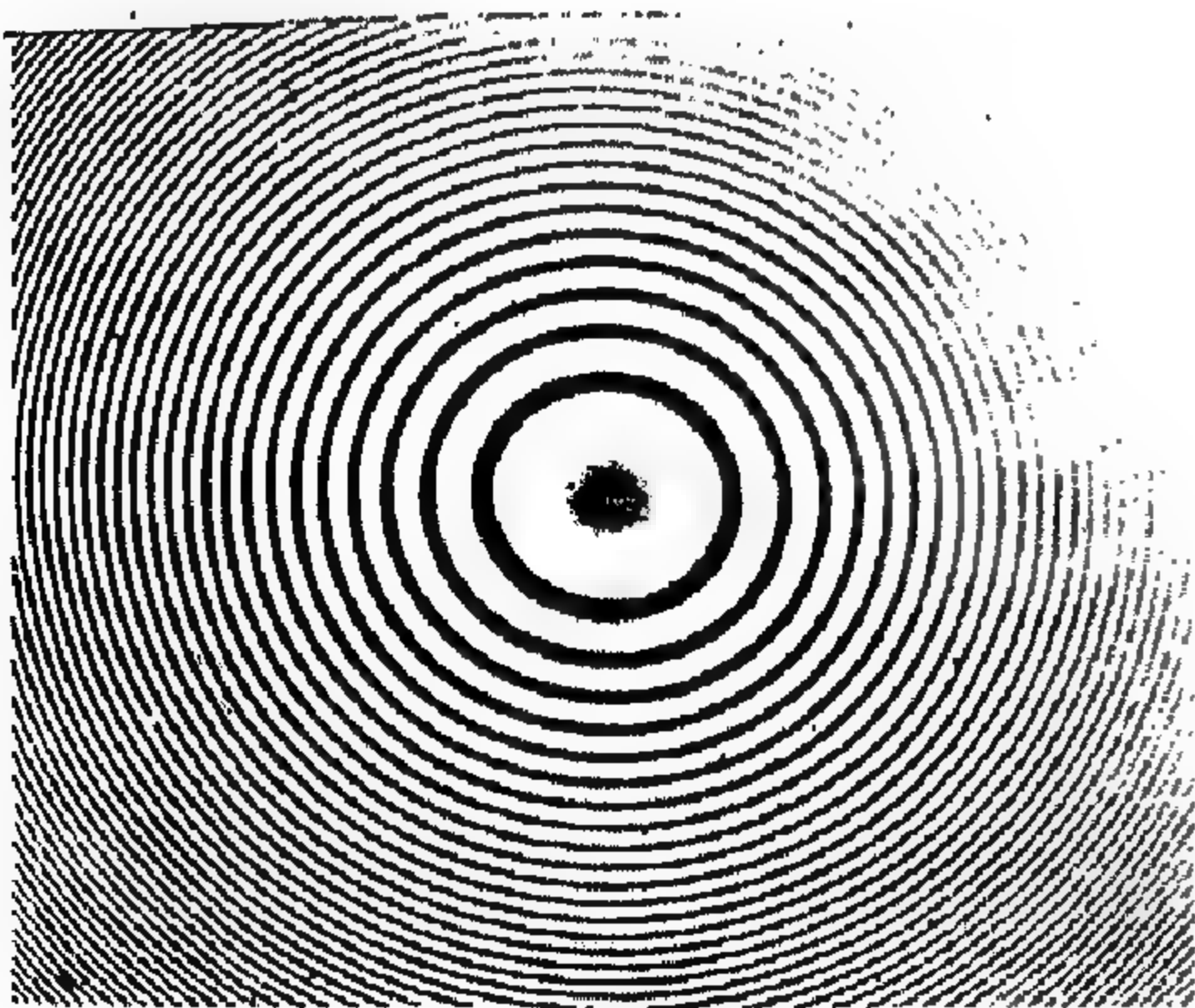
لاحظ أيضا أن نقطة تلامس اللوحين الزجاجيين في الشكل ٢٥ - ١١ مظلمة . وحيث أن الشعاع b يقطع أساسا نفس المسافة مثل الشعاع a عند هذه النقطة فإن المتوقع عادة هو أن تكون هذه النقطة ساطعة . وقد حاول الباحثون الأوائل تلميع السطحين بحيث يتم الحصول على سطوع عند هذه النقطة ، ولكنها كانت محاولات عقيمة . وعلى النقيض ، كلما كان التلامس بين اللوحين جيدا ، كلما أصبح الظلام أكثر وضوحا في هذه المنطقة . ونحن نعلم الآن أن الشعاع المنعكس بواسطة مادة كثيفة ضوئيا ، أى ذات معامل انكسار n كبير ، يعاني تغيرا في الطور مقداره 180° في هذه العملية . ومع ذلك فإن هذا لا يهمنا الآن لأننا نهم أساسا بتغيرات السمك كما سنبين في المثال التوضيحي الآتي .

مثال توضيحي ٢٥ - ٢ . يمكن مشاهدته الظاهرة المعروفة بحلقات نيوتن عندما توضع عدسة محدبة مستوية على لوح زجاجي مستو كما هو مبين في الشكل ٢٥ - ١٢ أ . وعند اضاءة المجموعة والنظر إليها من أعلى تشاهد مجموعة من حلقات التداخل كما هو مبين في الجزء ب . فإذا كان الطول الموجي للضوء المستخدم هو 5890\AA ، فما هو سمك الفرجة الهوائية عند موضع الحلقة المظلمة العاشرة ؟ كرر العمل بفرض أن الفرجة مملوءة بالماء (معامل انكسار الماء $n = 1.33$) .

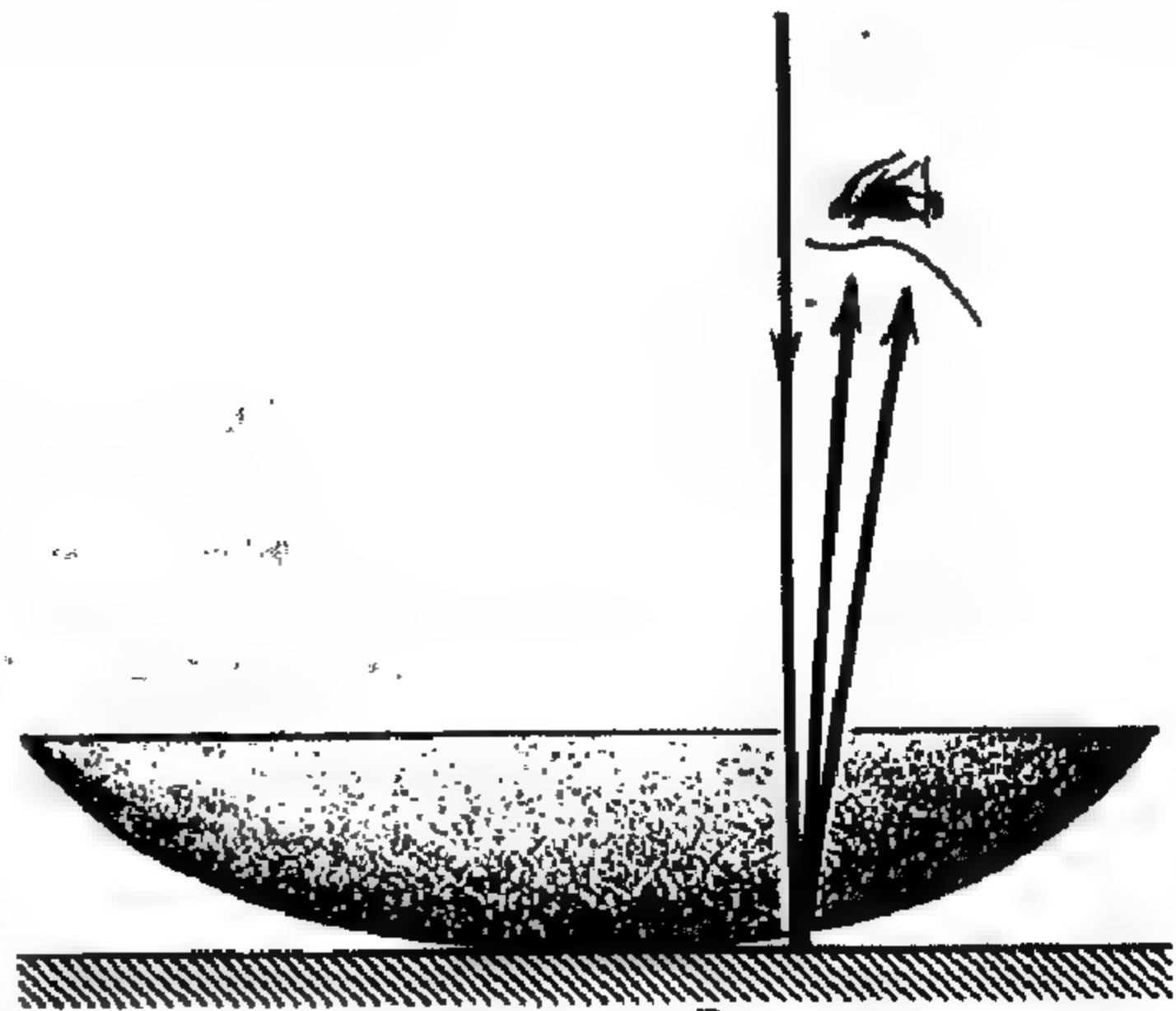
طريقة الحل . البقعة المركزية مظلمة ، وسمك الفجوة الهوائية في هذا المكان يساوى صفرا . وعند الانتقال إلى الحلقة المظلمة الأولى لابد أن يكون الشعاع قد تأخر مسافة قدرها λ . وعليه فإن سمك الفجوة في هذا المكان هو $\lambda/2$. بالمثل ، عند الانتقال من الحلقة الأولى إلى الثانية يزداد سمك السفين بمقدار اضافي قدره $\lambda/2$ ، أى أن سمك السفين هو $2(\lambda/2)$. من الواضح إذن أن سمك السفين عند وضع الحلقة المظلمة العاشرة هو $10(\lambda/2)$. إذن سمك الفجوة عند موضع الحلقة المظلمة العاشرة هو :

شكل (٢٥ - ١٢)
كون هذب التداخل ، أى لقات نيوتن ، الموضحة في (ب) نتيجة لتداخل الاشعة ضوئية المنعكسة بواسطة سفين الهوائى المبين في (أ) .
بدون مقياس رسم)

صورة (ب) منشورة بتصريح من I



(ب)



(أ)

$$(10) \left(\frac{5.890 \times 10^{-5} \text{ cm}}{2} \right) = 2.945 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

وعمليا يمكن أن تستخدم درجة ملاسة وانتظام الدوائر أو هدب التداخل الأخرى لتعيين مدى استواء الأسطح .

وفي حالة السفين الملىء بالماء يكون طول المسار الضوئي المكافئ 1.33 مضروبا في ضعف السمك . ونتيجة لذلك فإن سمك الفجوة سيكون $1/1.33$ مضروبا في القيمة السابق إيجادها . أى أنه $2.21 \times 10^{-4} \text{ cm}$.

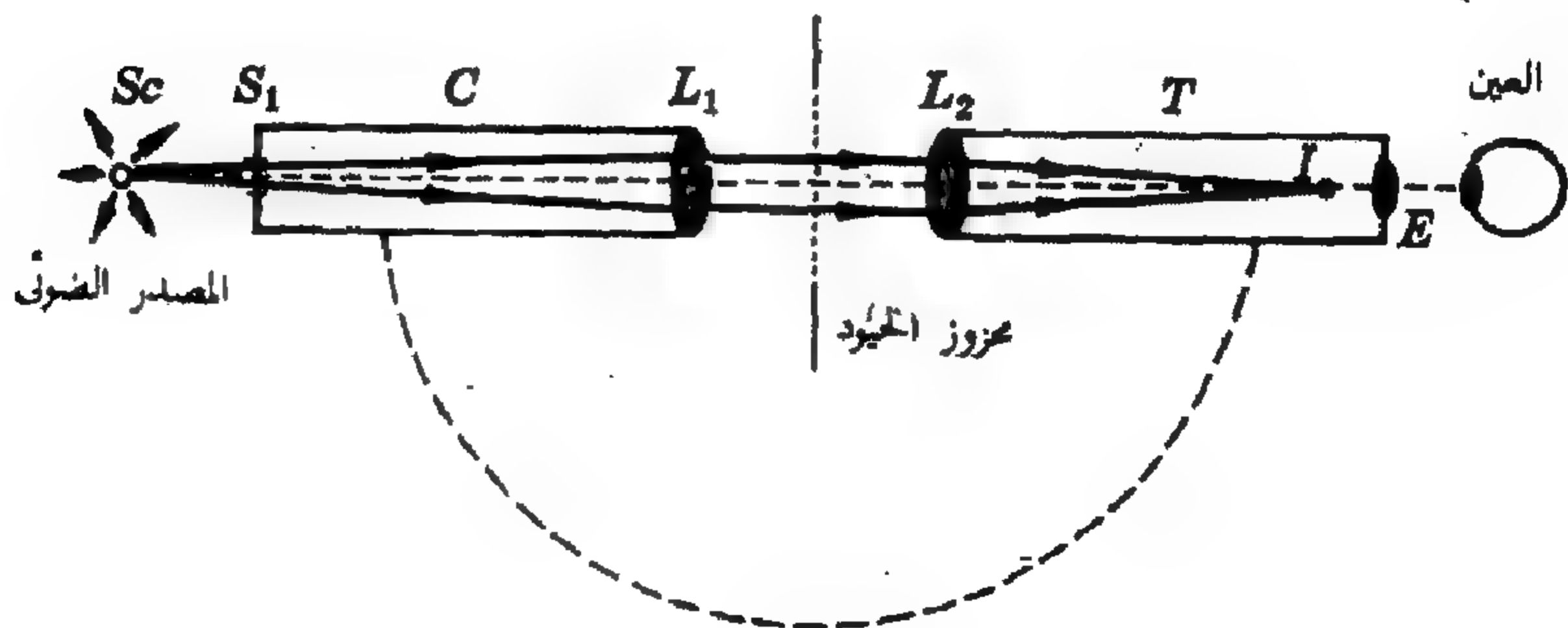
٢٥ - ٧ محزوز الحيود

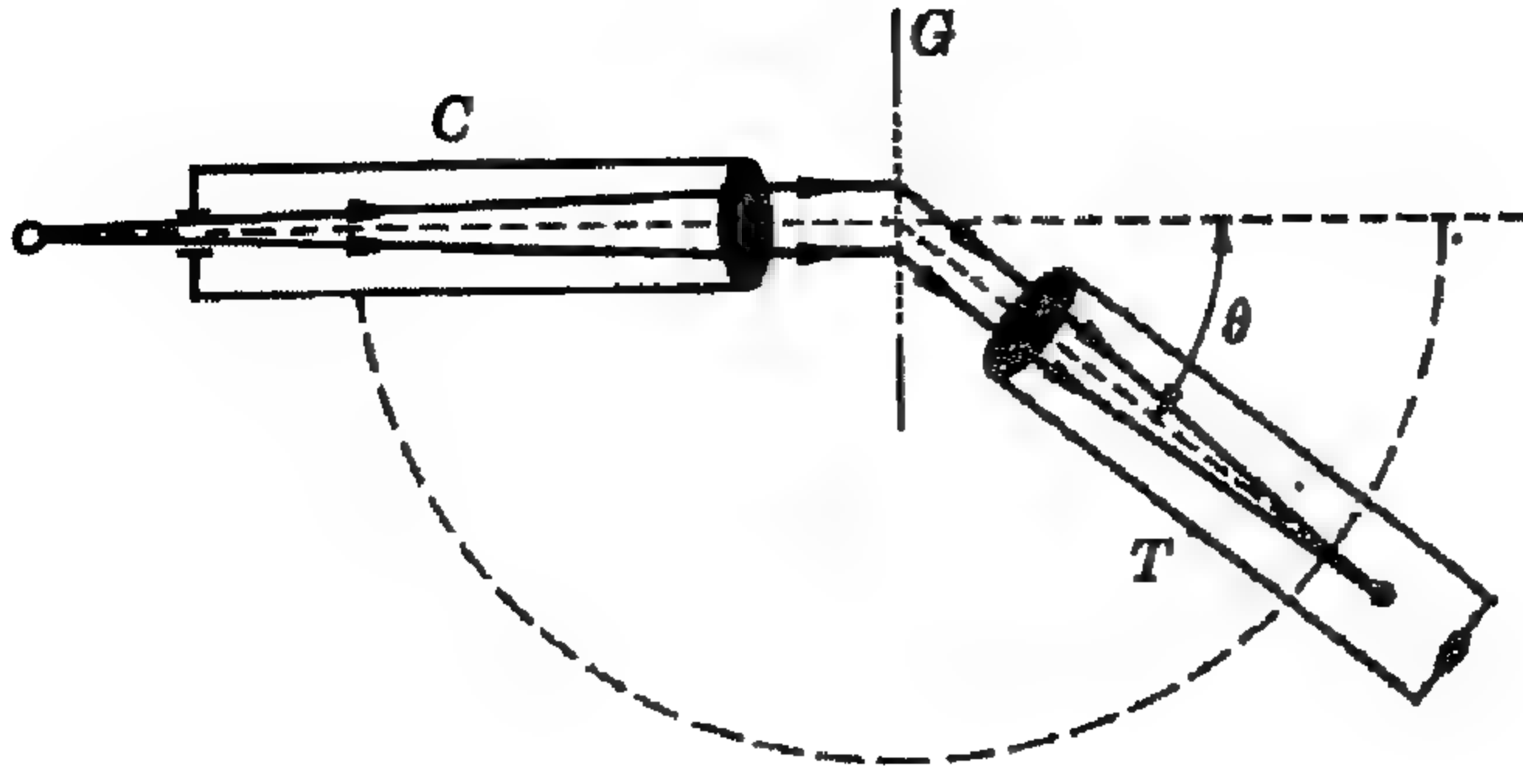
يستخدم محزوز الحيود عادة لقياس الطول الموجي للضوء بدقة كبيرة . ويسمى الجهاز المبني لهذا الغرض المطياف ذو محزوز الحيود . والمحزوز نفسه عبارة عن عدد كبير من الشقوق المتوازية في ستار معتم منتظمة البعد عن بعضها البعض .

ويحتوى المحزوز العادى على 10,000 شق في مسافة قدرها 1 cm . وعليه فإن المسافة a بين مركزي شقين متجاورتين ستكون 0.0001 cm . وسوف نرى أن عمل هذا الجهاز لا يختلف كثيرا عن شقوق يونج المزدوجة .

يمثل الشكل (٢٥ - ١٣) رسما تخطيطيا لمطياف (أو مرصمة طيف) معناد ذو محزوز حيود . يضئ الضوء من المصدر S_c الشق S_1 الموجود في نهاية أنبوبة C تسمى الميزاء (أى موجه الأشعة) ، وهى تستخدم لجعل الأشعة متوازية . ويتم ذلك بأن توضع العدسة L_1 في موجه الأشعة بحيث تكون S_1 في بؤرتها . ولهذا فإن الضوء الخارج من الشق يتحول الى ضوء متواز ، أى مسدد ، بواسطة العدسة L_1 . وتُمر هذه الحزمة الضوئية المتوازية بعد ذلك في محزوز الحيود وتدخل التلسكوب T . وتكون العدسة L_2 صورة للشق عند I وتشاهد هذه الصورة في العدسة العينية E . والتلسكوب مصمم بحيث يمكن إدارته بزوايا معلومة بدقة كما هو مبين في الشكل (٢٥ - ١٤) .

شكل (٢٥ - ١٣)
رسم تخطيطى لمطياف ذى
محزوز حيود





شكل (٢٥ - ١٤)
عندما يدار التلسكوب على
قوس دائرة كما هو مبين تكون
صورة للشق بالتداخل عند
الزاوية θ بالنسبة للشعاع
المباشر

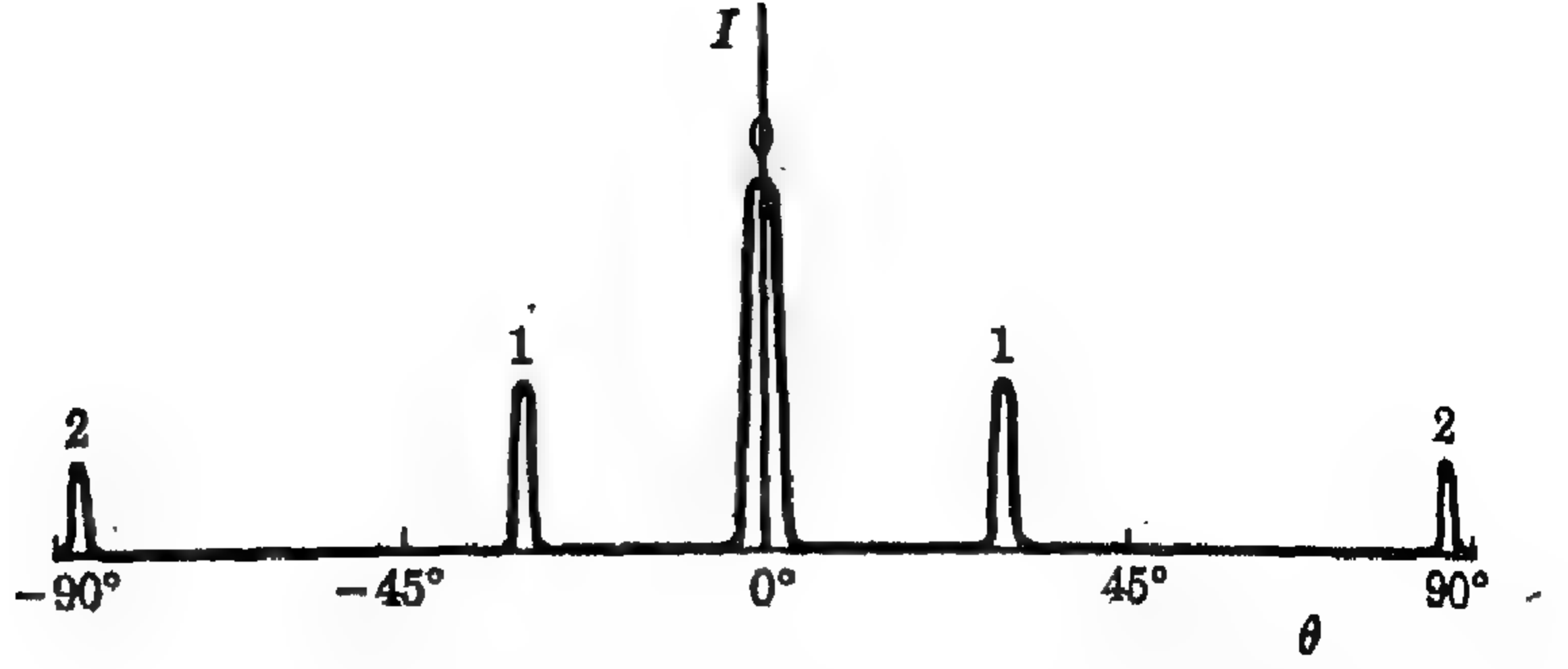
وبالطبع عندما تكون الزاوية θ صفرا يرى المشاهد صورة واضحة لشق موجه
الاشعة . وتسمى هذه الصورة بأسماء مختلفة هي النهاية العظمى المركزية ، النهاية
العظمى ذات الرتبة الصفرية ، الصورة المركزية . ويلاحظ أن لون هذه الصورة هو
نفس لون المصدر الضوئي ، فاذا استخدم الضوء الأبيض فان الصورة المركزية تكون
بيضاء أيضا . وعندما تتطابق الشعيرتين المتعامدتين الموجودتين في التلسكوب مع هذه
الصورة تكون الزاوية θ في الشكل (٢٥ - ١٤) صفرا .

من المتوقع أن تتشابه ظواهر التداخل المشاهدة بواسطة مثل هذا الجهاز عديد
الشقوق الى حد ما مع تلك الظواهر التي تشاهد بواسطة الشق المزدوج . وهذا
صحيح بالفعل . ومع ذلك فان نمط الحيود المشاهد في حالة محزوز يحتوي على آلاف
الشقوق أكثر حده من النمط المتكون في حالة الشق المزدوج . وعند استخدام الضوء
الاصفر المنبعث من القوس الصوديومي لاضاءة شق موجه الاشعة سنشاهد نمط شدة
الضوء المبين في الشكل (٢٥ - ١٥) كدالة في الزاوية θ .

وفي حالة الجهاز الجيد تكون الصور المتكونة عند المواضع 0 ، 1 ، 2 أكثر حده
مما هو مبين . ومقارنة هذا الشكل بالشكل (٢٥ - ٨) الذي يمثل رسما تخطيطيا
مشابها لنمط التداخل المتكون بواسطة الشق المزدوج سنجد أن نمط التداخل في
حالة محزوز الحيود أكثر اتساعا في الزاوية وأكثر حده من نمط التداخل
المتكون بواسطة الشق المزدوج . وتسمى الصور المرئية خلال التلسكوب عند
زوايا متساوية على جانبي النهاية العظمى المركزية بالنهايات العظمى ذات الرتب
العليا . فمثلا تسمى صورتان 1 في الشكل ٢٥ - ١٥ بالنهايتين العظميتين ، أو
الطيف ، ذات الرتبة الثانية . وقد ترى رتبة واحدة أو ربما عدة رتب قبل الوصول الى
الموضع 90° ويعتمد ذلك على جوده محزوز الحيود . والآن سوف نشق العلاقة بين
مواضع الرتب والطول الموجي للضوء .

شكل (٢٥ - ١)

يعطى محزوز الحيود صورة
مركزية وصورتا جانبيتا متماثلتا
وتكون الخطوط أكثر حدة مما
هو مبین في حالة المحزوز
الجيد .



اعتبر محزوز حيود يحتوي على أربعة آلاف شق مستعينا بالشكل (٢٥ - ١٦) . من الواضح أن الأشعة المباشرة ، أو المستقيمة ، المبينة في الجزء أ متفقة الطور وأنها سوف تقوى كل منها الأخرى عند تجميعها في داخل التلسكوب .

ومع ذلك فإن الأشعة الخارجة من الشقوق والمبينة في الجزء ب سوف تقطع مسافات مختلفة لتصل إلى التلسكوب . وكما هو مبین يقطع الشعاع f مسافة قدرها Δ أطول من المسافة التي يقطعها الشعاع g . كذلك فإن g يقطع مسافة قدرها Δ أطول من تلك التي يقطعها h وهكذا . فإذا كانت المسافة Δ مساوية لعدد صحيح من الأطوال الموجية ، فإن الأشعة الخارجة من جميع الشقوق سوف يقوى كل منها الآخر . وتتكون النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى إذا كانت $\Delta = \lambda$ ، كذلك فإن النهاية العظمى ذات الرتبة الثانية تتكون عندما تكون $\Delta = 2\lambda$. وعموماً فإن لنهاية العظمى ذات الرتبة n (إذا كان ذلك ممكناً) تتكون عندما تكون $\Delta = n\lambda$.
يتضح لنا من الوهلة الأولى من المثلث الصغير في الجزء (ب) من الشكل (٢٥ - ١٦) أن :

$$\sin \theta = \frac{\Delta}{d}$$

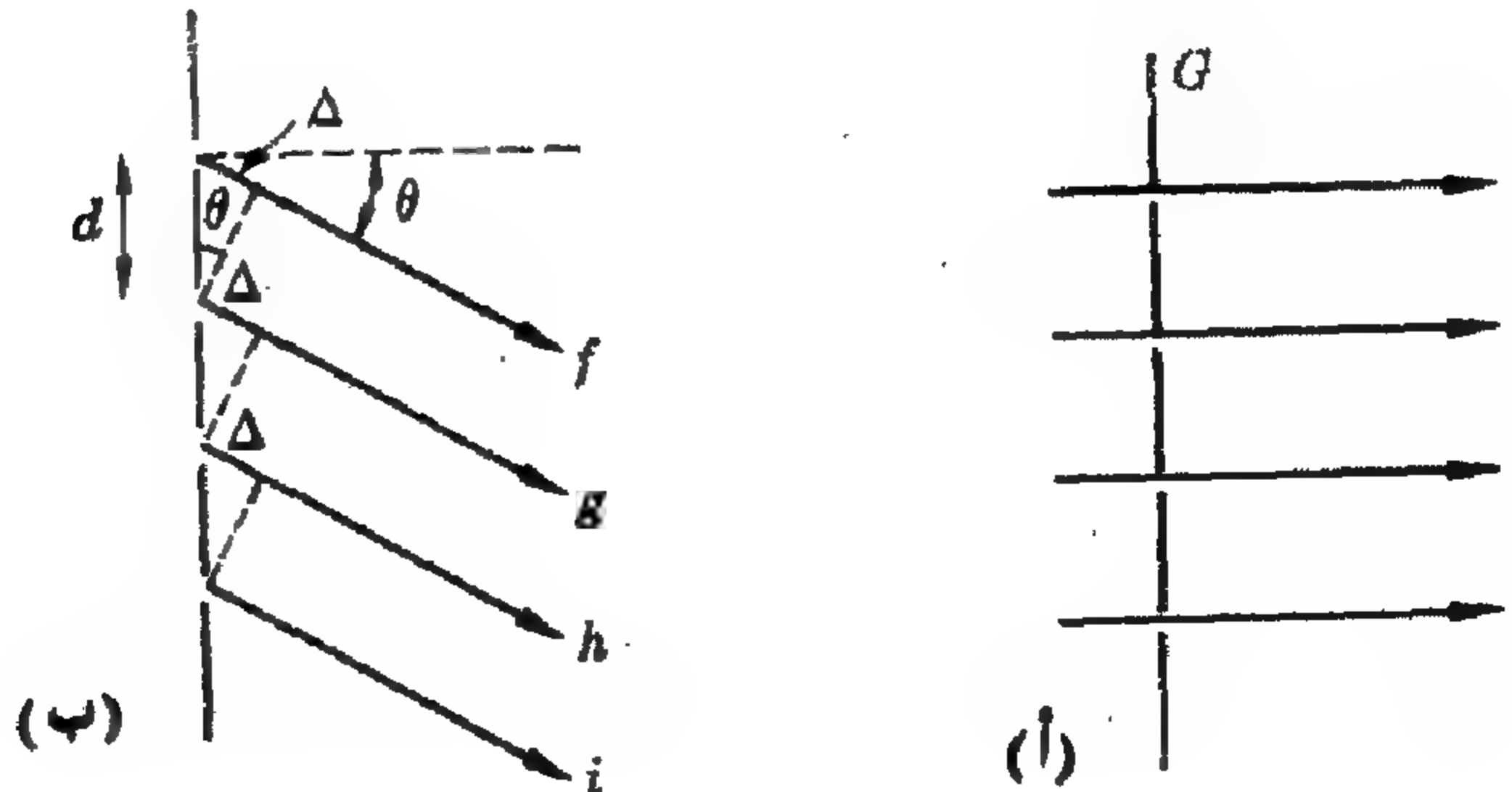
وحيث أن $\Delta = n\lambda$ بالنسبة للنهاية العظمى ذات الرتبة n ، فإن الموضع الزاوي θ للنهاية العظمى ذات الرتبة n تعطى بالمعادلة الآتية :

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

معادلة المحزوز ٢٥ - ٢

شكل (٢٥ - ١٦)

تقوى الأشعة كل منها الآخر
إذا كانت المسافة Δ في الجزء
(ب) مساوية لعدد صحيح
من الأطوال الموجية . ويكون
المحزوز النهايات العظمى عند
هذه الزوايا بالذات .



وهذه المعادلة تسمى معادلة المحزوز .

وحيث أن من الممكن قياس الزاوية التي توجد عندها النهاية العظمى ذات الرتبة n بدقة كبيرة ، فإنه من الضروري معرفة البعد البيني للمحزوز d فقط لكي يمكننا تعيين λ بدقة . فمثلا ، اذا استخدمنا الضوء الصوديومي في مطياف بسيط فاننا سوى نرى بسهولة أن الضوء الصوديومي يعطى صورتين (أو خطين) للشق عند كل موضع للرتب المختلفة وهذان الخطان متقاربان وطولاهما الموجيان هما 5890\AA و 5896\AA . وتعتبر حقيقة أننا نستطيع رؤية هذين الخطين كصورتين متميزتين مقياسا لدقة مثل هذا الجهاز .

أنواع الطيف

واذا استخدمنا الضوء الزئبقى في مطياف ذى محزوز فاننا سوف نرى عدة خطوط ملونة مختلفة في كل رتبة . وكما وضعنا سابقا ، يتكون الضوء الزئبقى من خط أصفر (5790\AA) وخط أصفر مخضر (5461\AA) وخط أزرق (5358\AA) وخط بنفسجى (4047\AA) بالإضافة الى خطوط أخرى باهتة أقل أهمية (تسمى الخطوط الموجودة في طيف المصدر الضوئى بخطوط الطيف . وهى في الحقيقة صور لشق مرسمة الطيف . وتظهر هذه الصور كخطوط ساطعة في الصورة الفوتوغرافية ، ولذلك تستخدم كلمة خط) . وسوف نرى في فصول لاحقة أن هناك أيضا أنواع أخرى من المصادر الضوئية . فبينما يتكون الضوء المنبعث من القوس الزئبقى من خطوط متميزة سهلة الرؤية (تسمى الطيف الخطى الساطع) ، يحتوى الضوء المنبعث من المصابيح المتوهجة على جميع الالوان ولا تشاهد أى خطوط حادة فيه . لذلك يقال أن المصدر الضوئى المتوهج يعطى طيفا مستمرا لاننا نشاهد شريطا مستمرا من الالوان عندما يستخدم هذا المصدر في مطياف وتوضع هذه الحقائق بجلاء في اللوحة الملونة . مثال توضيحى ٢٥ - ٣ يحتوى محزوز حيود معين على 10.000 خط في السنتيمتر عند أى الزوايا يظهر خط طوله الموجى 5890\AA ؟

طريقة الحل . البعد البيني للمحزوز d يساوى $\frac{1}{10,000}\text{cm}$ باستخدام معادلة المحزوز نجد أن :

$$\sin \theta_1 = \frac{5.89 \times 10^{-5}}{10^{-4}} = 0.589$$

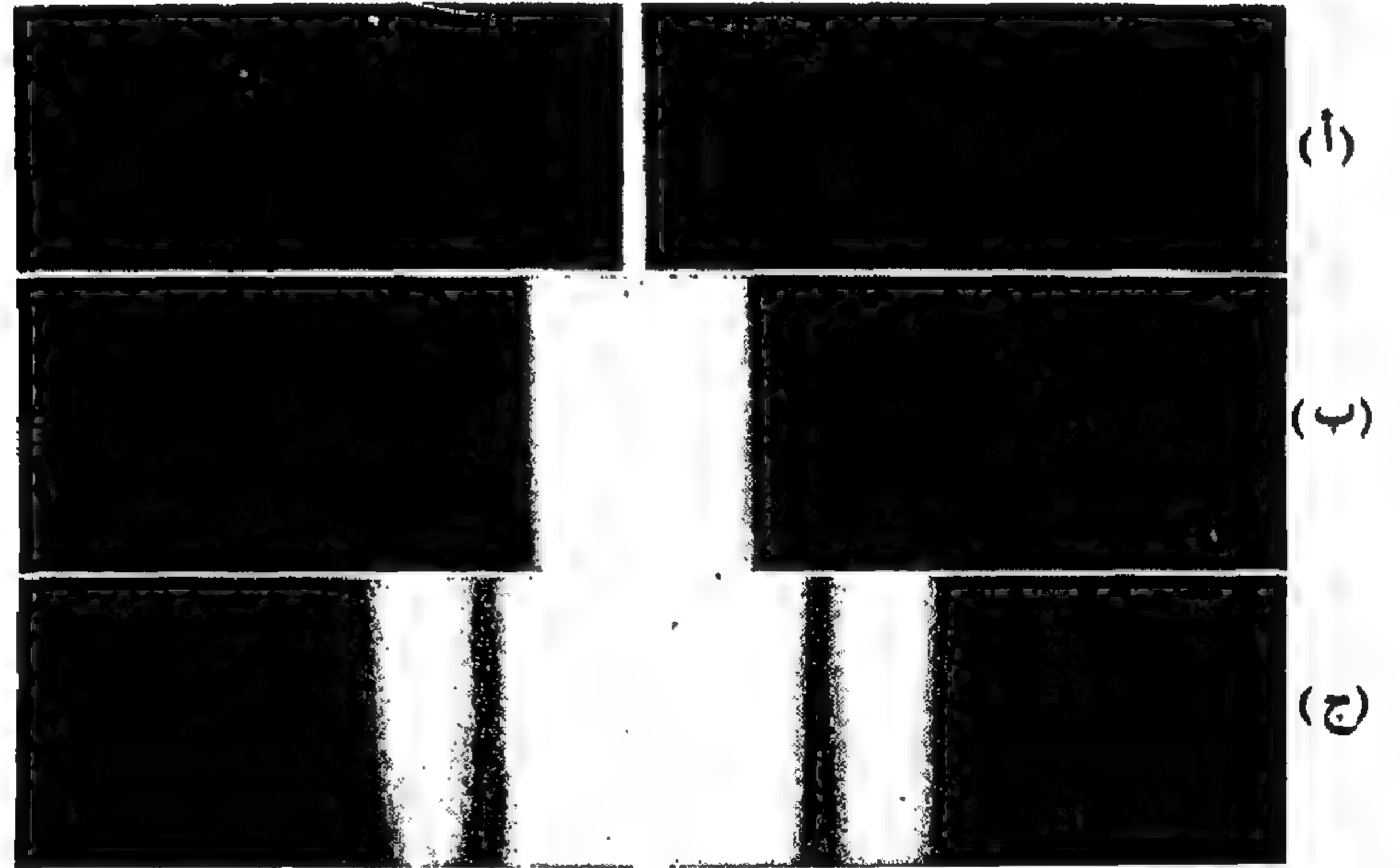
ومن جداول الجيوب نجد أن $\theta_1 = 36^\circ$ ، وعليه فان الصور ذات الرتبة الاولى سوف توجد عند هذه الزاوية على جانبي النهاية العظمى المركزية . وبالنسبة للرتبة الثانية نجد أن :

$$\sin \theta = (2) \left(\frac{5.89 \times 10^{-5}}{10^{-4}} \right) = 1.178$$

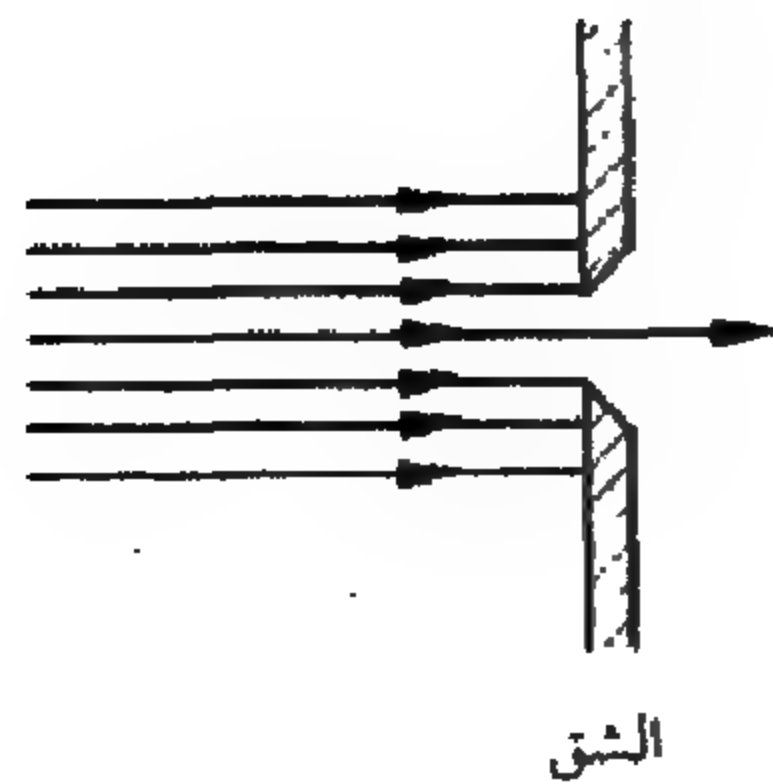
وحيث أن جيب الزاوية لا يمكن أن يكون أكبر من الوحدة ، فإن الصور ذات الرتبة الأعلى لن توجد .

٢٥ - ٨ الحيود بواسطة شق احادى

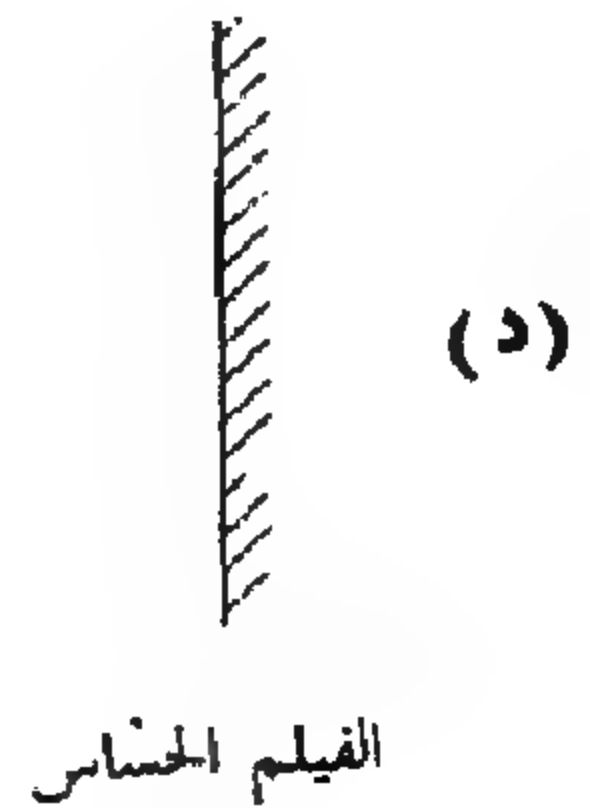
بناءً على ما سبق ذكره في الاجزاء الاولى من هذا الفصل لا يجب أن ندهش عندما نعلم أن الحزمة الضوئية لا تعطى صورة حادة للشق الذى تمر خلاله . فمثلاً ، عندما تمر حزمة ضوئية خلال شق احادى كما هو مبين في الشكل (٢٥ - ١٧) تظهر الصور المحصلة على اللوح الفوتوغرافى كما هو مبين في الجزئين ب ، ح من الشكل . ومن الواضح أن البقعة الساطعة المركزية أكثر اتساعاً من الشق بدرجة كبيرة . علاوة على ذلك يلاحظ ظهور شرائط ساطعة على جانبي الصورة المركزية . وهى تتكون نتيجة لنوع معين من ظواهر التداخل . لتعرف الآن على ما يحدث في مثل هذا الموقف .



شكل (٢٥ - ١٧)
صورة فوتوغرافية لثلاث حيود
الشق الأحادى المتكون
باستخدام الترتيب المبينة في
(د) . عرض الشق موضع
في (أ) . ويمثل (ب) و (ح)
صورتين فوتوغرافيتين التقطتا
باستخدام زمنى تعريض
مختلفين (After Jenkins
and White.)



الشق

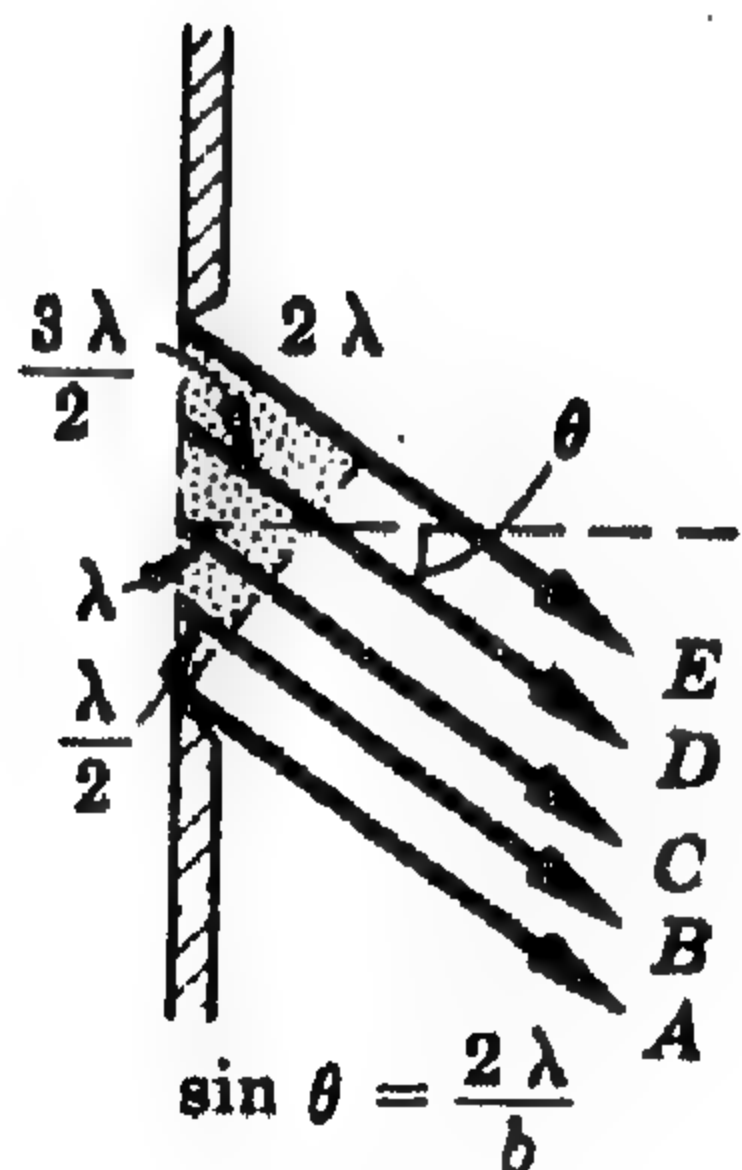


الفيلم الحساس

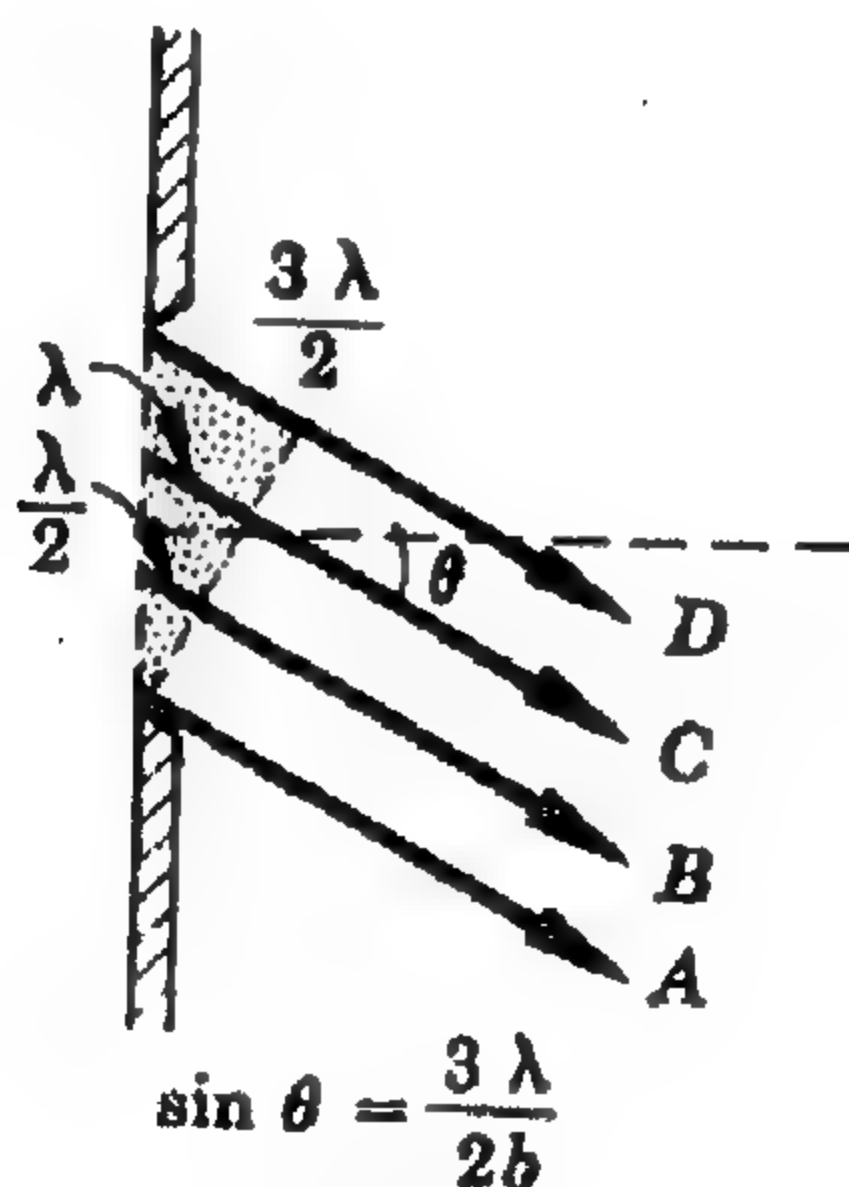
واضح من الشكل (٢٥ - ١٨) أن الاشعة الضوئية التي تمر خلال الشق الاحادى فى اتجاه السقوط متفقة جميعها فى الطور . لذلك فان الموضع الذى يقع على خط مستقيم مع الشق فى اتجاه السقوط يكون ساطعا مما يؤدى الى ظهور البقعة الساطعة المركزية المبينة فى الشكل (٢٥ - ١٧) . وبالرغم من ذلك فان الاشعة التى تترك الاجزاء المختلفة للشق فى اتجاه يصنع زاوية θ مع الحزمة الضوئية المباشرة سوف تقطع مسافات مختلفة الى الفيلم الحساس أو اللوح الفوتوغرافى . ويمثل الشكل (٢٥ - ١٨ ب ، ح ، د) أهم الحالات .

يلاحظ من الجزء ب أن الشعاع B الذى يترك الشق عند منتصفه متأخر بمقدار نصف الطول الموجى عن الشعاع A . نتيجة لذلك يلاشى كل من هذين الشعاعين الآخر . ولكن هذا ليس كل ما فى الأمر ، لأننا نرى أن الشعاعين اللذين يتركان الشق عند الموضعين اللذين يقعان فوق A و B مباشرة يلاشى كل منهما الآخر أيضا لأن فرق المسار بينهما هو $\lambda/2$ أيضا . وفى الحقيقة فان كل شعاع يترك النصف العلوى للشق سيجد شعاعا آخر يترك النصف السفلى ويلاشيه . وعليه فلن يصل أى ضوء من الشق الى الفيلم عند هذه الزاوية θ ، ولذلك فاننا سنلاحظ ظلاما فى هذا الموضع . وكما نرى من الشكل يحدث ذلك عندما تكون $\theta = \lambda/b$ ، حيث b عرض الشق . لاحظ أنه اذا كان عرض الشق b مساويا للطول الموجى للضوء فان البقعة المظلمة تتكون عند $\theta = 90^\circ$.

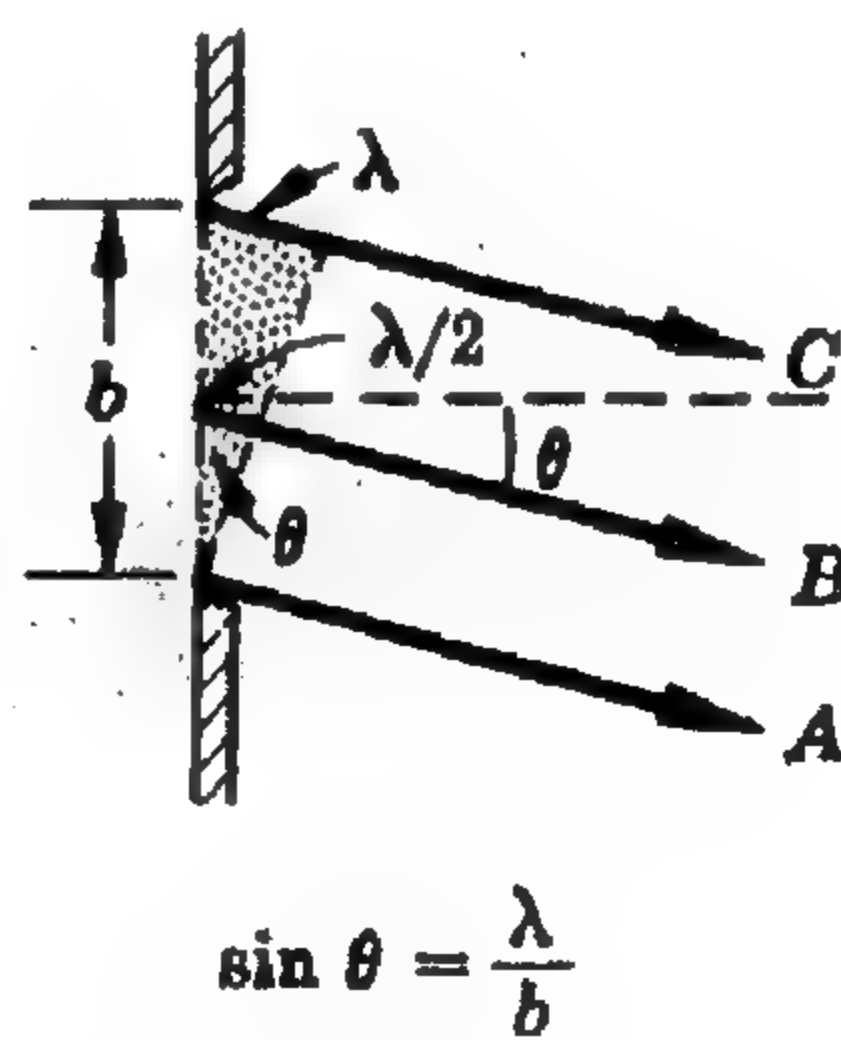
شكل (٢٥ - ١٨)
عند تحليل نمط الحيود المتكون بواسطة الشق الاحادى كما يقسم الشق إلى أجزاء تختلف أشعتها فى طول المسار بمقدار $\lambda/2$. لماذا ؟



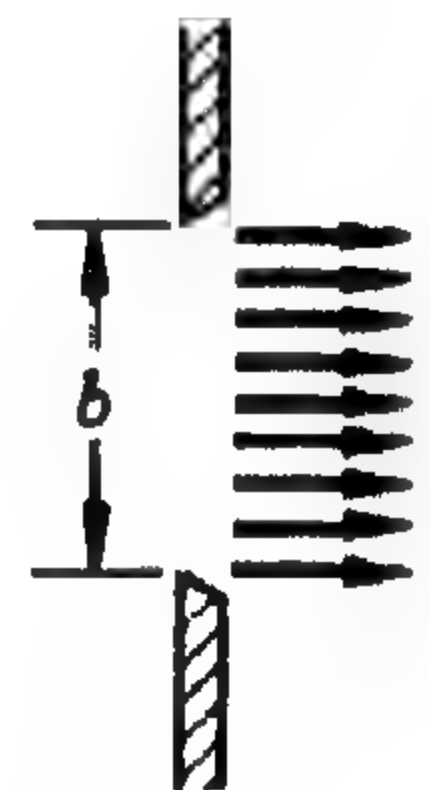
(د) بقعة مظلمة



(ج) بقعة ساطعة



(ب) بقعة مظلمة



(أ) بقعة ساطعة

ويمكننا صياغة ذلك بالألفاظ كالتالى : إذا نقص عرض الشق حتى أصبح مساويا للطول الموجى للضوء λ فإن صورته الشق تنتشر لتصبح لانهاية فى العرض .

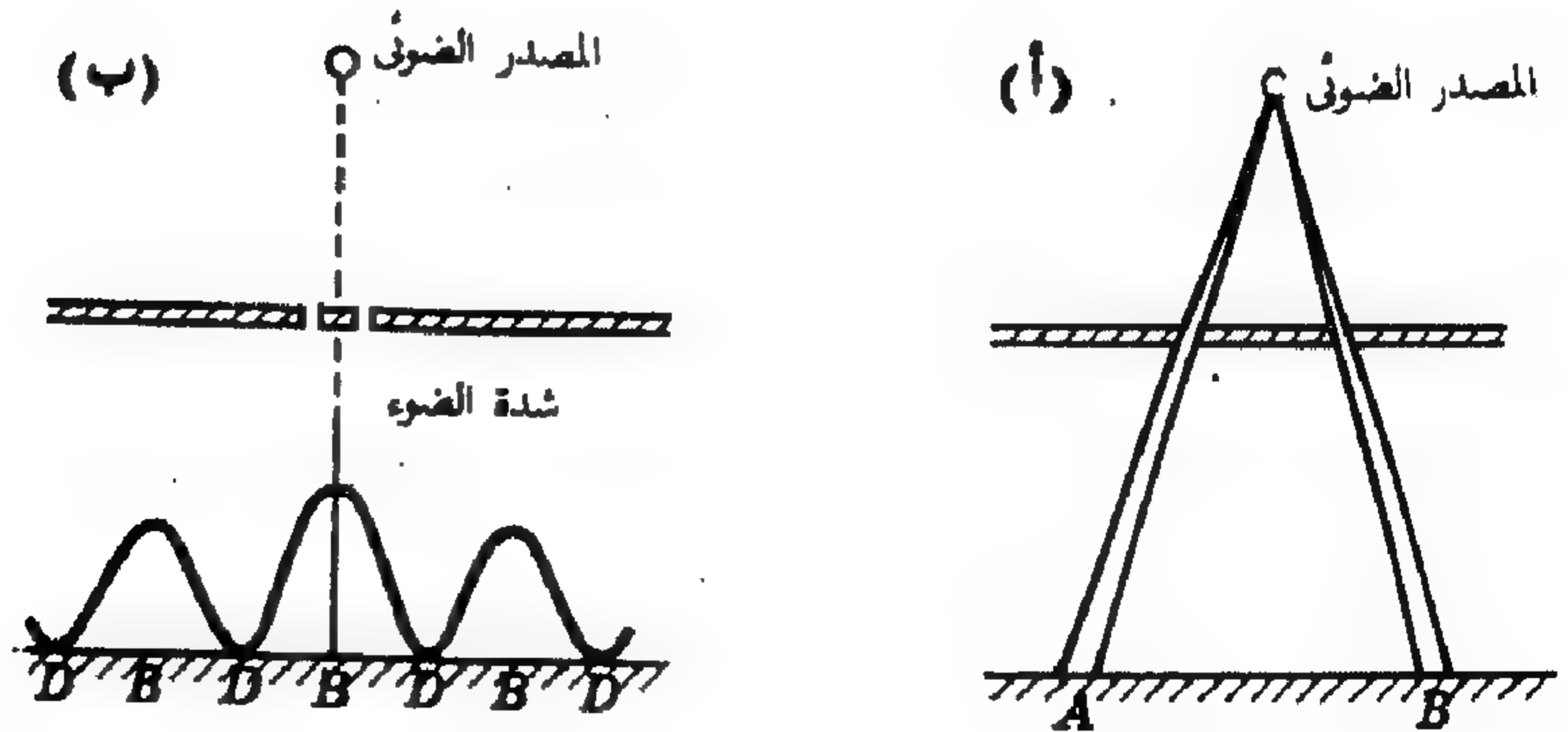
وإذا كان θ أكبر كثيراً من λ ، كما هو موضح في شكل ٢٥ - ١٨ ، تتكون هدبة ساطعة عند الزاوية θ المبينة في الجزء ح . وفي هذه الحالة تتلاشى الأشعة التي تترك الثلث السفلى للشق الأشعة التي تترك الثلث الأوسط بينما لا تتلاشى الأشعة التي تترك الثلث العلوى . ويتكون الظلام مرة أخرى عند الزاوية الأكبر المبينة في الجزء د . وهنا يمكننا أن نعتبر أن الشق مكون من أربعة أرباع . وفي هذه الحالة تتلاشى أشعة الربع السفلى مع أشعة الربع الذى يقع فوقه مباشرة . وبالمثل تتلاشى أشعة الربعين العلويين كل منهما الآخر ، ولذلك يشاهد الظلام عند هذه الزاوية . وهذه هى إذن تفسيرات السمات المختلفة لنمط حيود الشق الأحادى الموضح في الشكل ٢٥ - ١٧ .

٢٥ - ٩ الحيود وحدود التحليل

يقال عادة أن الضوء يسير في خطوط مستقيمة . فعند مرور الضوء خلال فتحتين في سور نتوقع أن نرى حزمتين ضوئيتين خارجيتين من الفتحتين كما هو مبين في الشكل ٢٥ - ١٩ . نتيجة لذلك لابد أن تظهر بقعتان ساطعتان A و B على الحائط المواجه للسور . وهذا هو ما يشاهد بالفعل . وبالرغم من ذلك فإن الموقف يختلف تماماً إذا كانت الفتحتان ضيقتين ومتقاربتين جداً كما في حالة الشق المزدوج . عندئذ لن تظهر صورتان متميزتان ، وبدلاً من ذلك سنرى نمط التداخل الموضح في الجزء ب من الشكل ٢٥ - ١٩ .

وقد ذكرنا في الجزء السابق مثالا آخر يوضح أن الضوء لا يسير دائماً في خطوط مستقيمة وذلك عند مناقشة الحيود بواسطة الشق الاحادى . وهناك أيضاً أمثلة كثيرة لهذا النمط من السلوك .

شكل (٢٥ - ١٩)
إذا كان انفصال الشقين
وعرضهما كبيرين بالمقارنة
بالطول الموجى للضوء تكون
صورتان للشقين عند A و B .
كما هو مبين في (أ) . وعندما
يكون عرض كل من الشقين
وانفصالهما مقارنا بالطول
الموجى للضوء يتكون نمط
تداخل كالمبين في الجزء
(ب) . (بدون مقياس
رسم) .





شكل (٢٥ - ٢٠)
ظل فلكة (وردة) نجمية
الشكل . ترى شرائط
التداخل بداخل الفتحة
وحول الحافة الخارجية
(Courtesy Bausch & Lomb
Optical Co.)

ويمثل الشكل ٢٥ - ٢٠ مثالا معقدا جدا ولكنه مثال نموذجي لهذا السلوك . ونحن نقابل مثل هذا الموقف دائما في جميع الحالات التي يتكون فيها الظل . ويكون الظل حادا نسبيا في حالة الأجسام الكبيرة . وتلاحظ أنماط التداخل أو الحيود قرب حافة الظل عندما يصبح الجسم صغيرا جدا . وقد لا يرى الظل إطلاقا إذا كان حجم الجسم مقارنا بالطول الموجي للإشعاع المستخدم لأن نمط التداخل يصبح تقريبا لا نهائيا في الكبر .

شرط رؤية التفاصيل

يجب أن نستنتج إذن أن من المستحيل الحصول على صور للأجسام التي تكون أبعاد تفاصيلها مقارنة بالطول الموجي للإشعاع المستخدم . وهذا هو السبب في أنه حتى أحسن الميكروسكوبات لا تستطيع أن تبين التفاصيل التي تكون أبعادها مقارنة بالطول الموجي للضوء أو أصغر منه . وبالرغم من أن الصيغة الدقيقة لقدرة الأجهزة البصرية على تحليل تفاصيل الأجسام الصغيرة جدا فوق مستوى موضوع هذا الكتاب ، فإن القاعدة التقريبية البسيطة هي أن التفاصيل الأصغر من بضعة أطوال موجية لا يمكن رؤيتها .

تنشأ بعض الظواهر المثيرة نتيجة للتداخل ، وسوف نذكر هنا واحده من أكثر هذه الظواهر إثارة . عندما يكون بنس ظلا في حزمة ضوئية ضيقة يلاحظ وجود نهايات عظمى وصغرى للتداخل ، أي مناطق ساطعة ومظلمة ، قرب حواف الظل . ولكن إذا فحصنا مركز الظل الدائري بعناية سنرى بقعة ساطعة صغيرة جدا . وفي

الحقيقة فإن تداخل الضوء المار حول البنس يسبب تكون بقعة ساطعة في مركز الظل . وسوف تناقش هذه الظاهرة وظواهر أخرى مشابهة عند دراسة البصريات الفيزيائية .

٢٥ - ١٠ حيود أشعة اكس بواسطة البلورات

وجدنا في الجزء ٢٥ - ٣ أن المسافة بين النهاية العظمى المركزية والنهاية العظمى ذات الرتبة الأولى في تجربة الشق المزدوج ليونج تعطى بالعلاقة :

$$x = \frac{\lambda}{d} D$$

وبالتالى أن انفصال ، فإذا كانت x كبيرة فإن λ/d لا يمكن أن تكون صغيرة جدا . وعليه فإننا نرى أن انفصال الشقين يجب أن يكون أصغر ما يمكن لكي نتمكن من مشاهدة ظواهر التداخل .

بالمثل في حالة هدب التداخل المتكونة بواسطة غشاء رقيق ، لا يجب أن يكون الغشاء سميكاً جداً وإلا كانت الهدب متقاربة جداً من بعضها البعض بحيث لا يمكن رؤيتها بسهولة . ويجب أن نتذكر هنا أن المسافة بين الهدب تعتمد على المسافة التي يجب أن تتحركها على طول الغشاء ليتغير سمكه بمقدار $\lambda/2$. بالإضافة إلى ذلك فإن الزاوية المضبوطة التي ينظر بها إلى الغشاء ذات أهمية في حالة الأغشية السميكة . وللحصول على هدب منفصلة انفصالياً واضحاً لا يجب أن يكون سمك الغشاء أكبر كثيراً من الطول الموجي للضوء المستخدم .

وتعتبر هذه الحقائق ذات أهمية خاصة إذا أريد الحصول على التداخل باستخدام أشعة اكس . وكما ذكرنا في الفصل الثانى والعشرين ، فإن أشعة اكس هي موجات كهرومغناطيسية ذات طول موجى قصير جداً يقترب من 10^{-8} cm . وإذا أردنا إجراء تجربة الشق المزدوج ليونج ولكن باستخدام أشعة اكس يجب أن يكون الانفصال بين الشقين 10×10^{-8} cm ، أو 10 Å . وحيث أن قطر الذرات يتراوح بين 2 Å و 5 Å ، من الواضح أنه من المستحيل الحصول على شقين بهذه المواصفات . بالإضافة إلى ذلك ، من المسلم به أنه من المستحيل الحصول على أغشية منفصلة بمثل هذه المسافات الصغيرة إلا في حالات خاصة جداً .

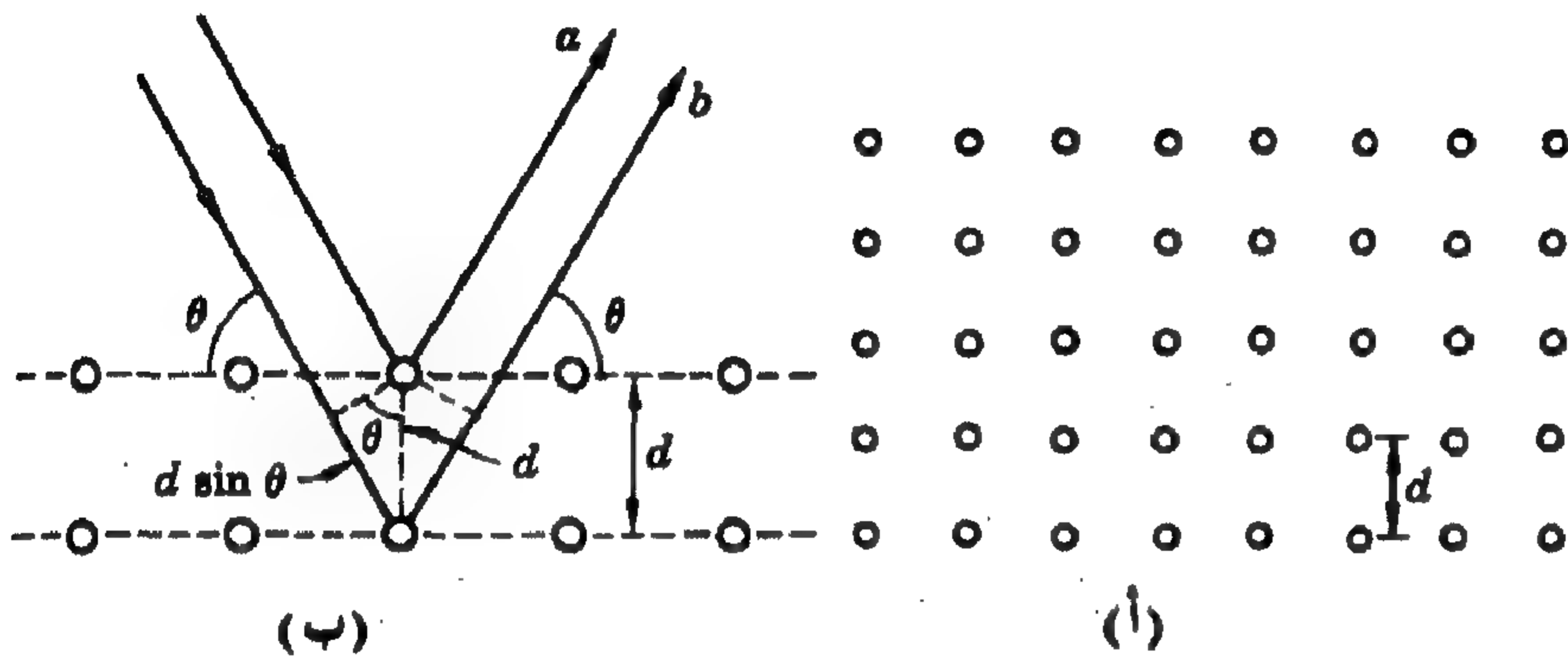
وبالرغم من ذلك فإن من الممكن الحصول على ظواهر تداخل باستخدام أشعة اكس . ويمكن تحقيق ذلك باستخدام بلورة كتلك الميّن مقطعتها في الشكل ٢٥ - ٢١ . وتوجد الذرات في البلورة (الملح الصخري على سبيل المثال) في

مستويات متساوية البعد عن بعضها البعض . لنفرض أن المسافة بين كل مستويين في البلورة هي d . وإذا سقطت حزمة من أشعة اكس على البلورة كما هو مبين في الجزء ب من الشكل ٢٥ - ٢١ فإن الشعاع a المنعكس من الطبقة العليا من الذرات لن يقطع نفس المسافة التي يقطعها الشعاع b . إذا كانت المسافة الإضافية التي يقطعها الشعاع b هي $2d \sin \theta$ تساوى عددا صحيحا من الأطوال الموجية فإن الشعاعين يقوى كل منهما الآخر . وعندما يحدث هذا تعكس جميع الطبقات أشعة يقوى كل منها الآخر . لهذا فإن الانعكاس القوي سوف يحدث إذا كان :

(٢٥ - ٣)

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

معادلة براج



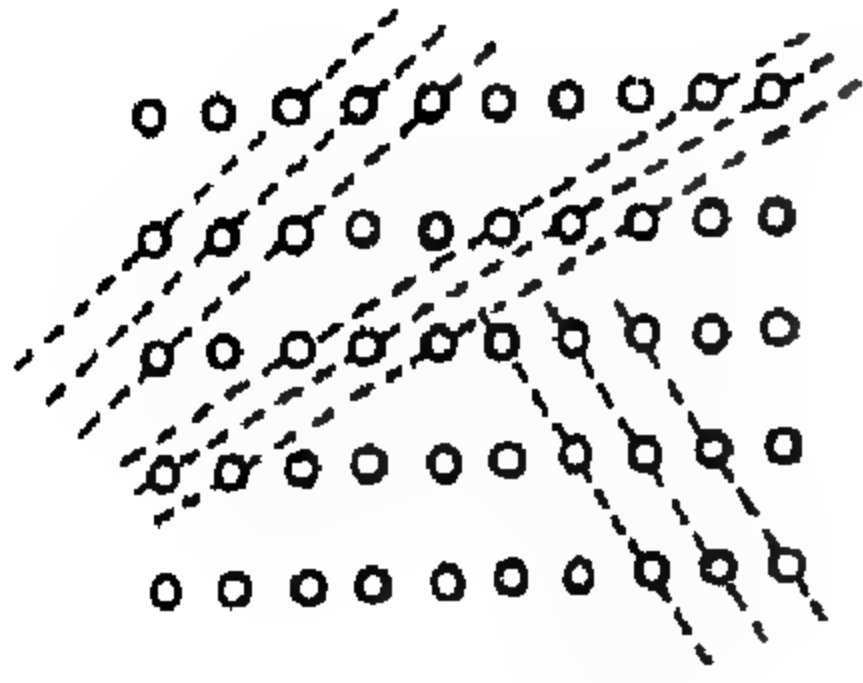
شكل (٢٥ - ٢١)

توجد الذرات في البلورة في مستويات متساوية البعد عن بعضها البعض . ويمثل الجزء (أ) مثالا للذرة بسيطة . عندما تعكس مستويات الذرات أشعة اكس كما هو مبين في (ب) ، تسبب الأشعة المنعكسة ظواهر التداخل .

حيث n عدد صحيح . وتسمى هذه العلاقة معادلة براج نسبة إلى و.ه. براج وابنه و.ل. براج اللذين استخدمهما على نطاق واسع في عام ١٩١٣ .

لاحظ أن المعادلة (٢٥ - ٣) تشبه معادلة المحزوز (٢٥ - ٢) ، ومع ذلك فإنها تختلف عنها بمعامل قيمته 2 . بالإضافة إلى ذلك تعرف الزاوية θ بطريقتين مختلفتين في هاتين الحالتين .

وقد أصبحت المعادلة (٢٥ - ٣) معادلة أساسية في كثير من القياسات الأساسية . وعلى سبيل المثال اعتبر ما يحدث في انعكاس براج من بلورة من الملح الصخري . حيث أن المسافة بين طبقات الذرات في الملح الصخري يمكن إيجادها بمعلومية كثافة الملح الصخري وكتلة ذرته فإن المسافة d تعتبر معلومة في هذه الحالة . وحيث أن كلا من n و θ يمكن قياسه فإن الطول الموجي لأشعة اكس يمكن إيجاده باستخدام المعادلة (٢٥ - ٣) وهذه هي إحدى الطرق التي بينت لنا أن الأطوال الموجية لأشعة اكس قريبة من 1 \AA وبالطبع إذا كان الطول الموجي λ معلوماً فإن المسافة d يمكن قياسها وهذا هو أساس مجال علم بلورات أشعة اكس الذي يقاس فيه تركيب البلورات باستخدام أشعة اكس .



شكل (٢٢ - ٢٥)

هناك كثير من مجموعات الطبقات المتوازية من الذرات في البلورة . ويوضح هذا الشكل ثلاثاً من هذه المجموعات

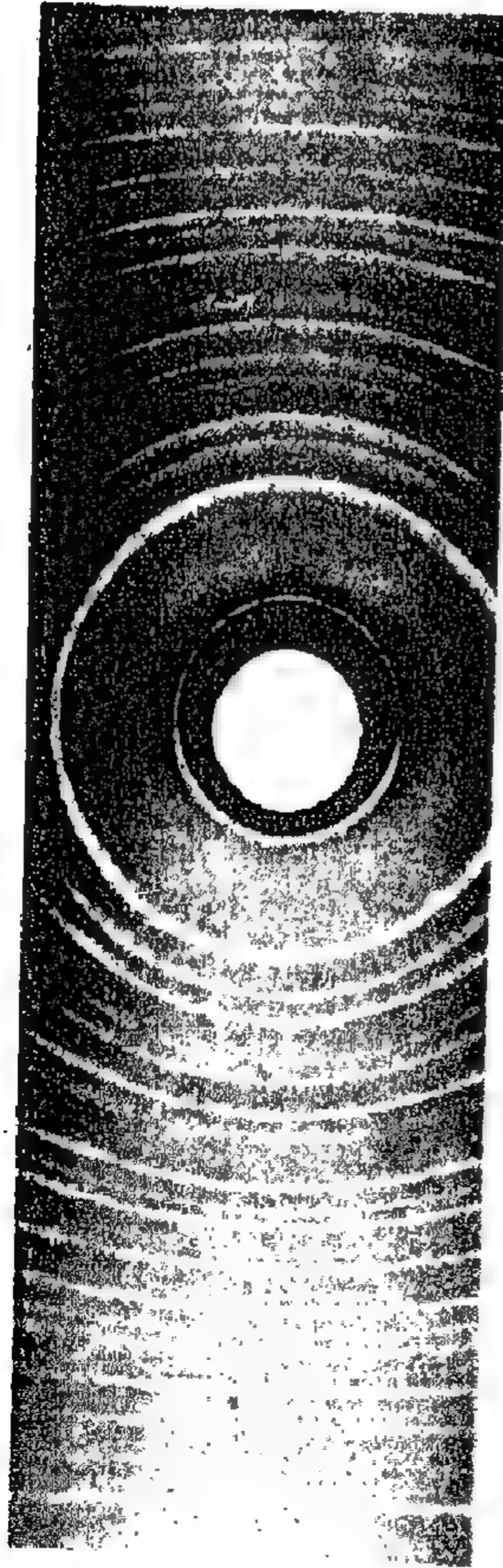
ولكن الأساليب التقنية الفعلية المستخدمة في تعيين التركيب البلوري باستخدام أشعة اكس معقدة جداً . لاحظ وجود كثير من المستويات الممكنة لطبقات الذرات في البلورة ، ويوضح الشكل ٢٥ - ٢٢ بعضاً منها . ويصبح الموقف أكثر تعقيداً في حالة البلورات ثلاثية الأبعاد . وحسب الطريقة التي تستخدم بها البلورة قد تتكون الصورة الفوتوغرافية لخط الحيود من سلسلة من النقاط أو مجموعة من الحلقات الدائرية أو الخطوط المتوازية وهكذا ، ويمثل الشكل ٢٥ - ٢٣ نوعين من الصور الفوتوغرافية التي يمكن الحصول عليها . وقد أخذت الصورة الموضحة في الجزء أ بالسماح لحزمة من أشعة اكس بالنفاذ خلال بلورة أحادية ، بينما أخذت الصورة الأخرى بطريقة مشابهة باستعمال مادة متعددة البلورات . ويعتبر تفسير هذه الصور في حد ذاته علماً على درجة عالية من التعقيد .

ومع ذلك فإن معظم معلوماتنا عن تركيب البلورات قد حصل عليها نتيجة لتحليل صور فوتوغرافية شبيهة بهذه الصور .

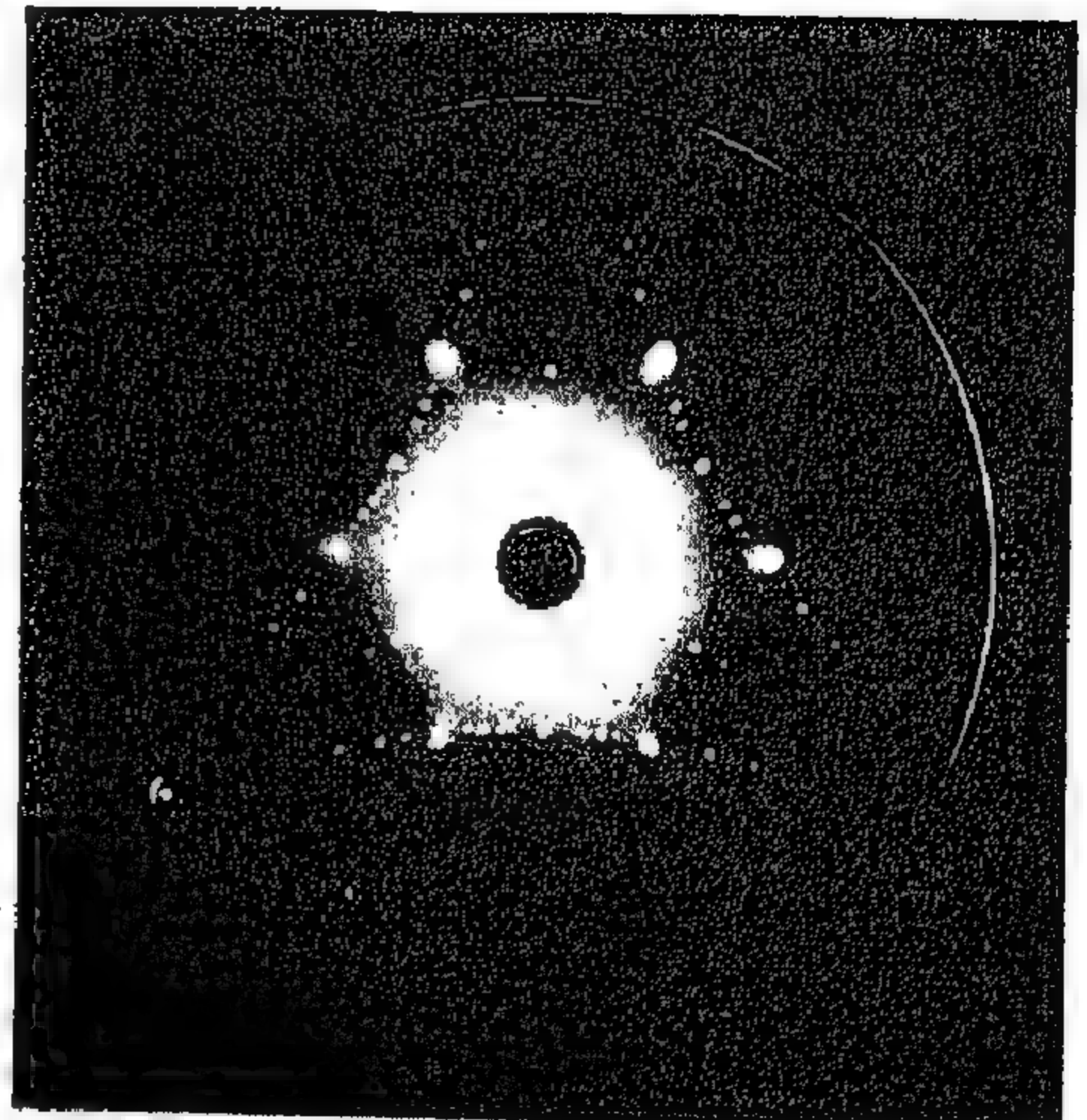
شكل (٢٣ - ٢٥)

إذا أسقطت حزمة من أشعة اكس على بلورة أحادية نحصل على صورة تداخل لآ .

(ب) إذا استخدم المسحوق البلوري بدلا من البلورة الأحادية فإننا نحصل على نمط تداخل ديبي - شيرر .



(ب)



(أ)

ملخص

تستطيع الموجات أن تنحني حول العوائق الى مناطق الظل الذى تكونه هذه العوائق . هذه الظاهرة تسمى الحيود وهى تنشأ نتيجة لخاصية تداخل الموجات .

تحدث ظواهر التداخل عند التقاء موجتين أو أكثر معا . تتداخل الموجتان متفقتا الطور أو متفاوتا الطور بمقدار $n\lambda$ (حيث n عدد صحيح) تداخلا بناء ، ويحدث التداخل الاتلافي إذا كانت الموجتان متفاوتتى الطور بمقدار 180° أو $\frac{\lambda}{2}$. ويحدث التداخل الاتلافي ، أيضا إذا كان فرق الطور $n\lambda + \frac{\lambda}{2}$ ، حيث n عدد صحيح .

يمكن الحصول على موجتين متماثلتين ، أى مترابطتين ، بتقسيم اضطراب موجى واحد إلى جزئين . فى تجربة الشق المزدوج ليونج تحدث الموجة الواحدة الساقطة على الشقين موجتين مترابطتين . عندئذ تتداخل كل من هاتين الموجتين مع الأخرى لتنتجا مجموعة من الهدب الساطعة والمظلمة . تعتمد مواضع الهدب على الطول الموجى للضوء ، لذلك فإن من الممكن استخدامها لقياس λ .

يمكن الحصول على موجتين مترابطتين بالانعكاسات الجزئية لحزمة ضوئية واحدة على سطحين . فى مقياس التداخل لمايكلسون تسير الموجتان الناتجتان بهذه الطريقة فى مسارين مختلفين ثم تلتقيان سويا مرة أخرى . ويمكن إجراء قياسات المسافة بدقة عالية جدا بتغيير طول مسار إحدى الموجتين . يمكن الحصول على الحزمتين الضوئيتين المتداخلتين أيضا بانعكاس حزمة ضوئية واحدة على سطحى غشاء رقيق أو فجوة رقيقة وحيث أن ظواهر التداخل تعتمد على الطول الموجى فإن هدب التداخل تكون ملونة بدرجة عالية عند استخدام الضوء الأبيض .

طول المسار الضوئى المكافئ لمسافة قدرها d فى مادة معامل انكسارها n هو nd . تسير الحزمة الضوئية مسافة قدرها nd فى الفراغ فى نفس الزمن اللازم لكى تقطع مسافة قدرها n فى المادة .

يتكون محزوز الحيود من آلاف الشقوق المتوازية والمتقاربة من بعضها البعض . نمط الحيود المكون بواسطة محزوز الحيود أكثر حدة من نمط حيود الشق المزدوج بدرجة كبيرة . يستخدم محزوز الحيود فى المطياف لتحليل الضوء . وفى مثل هذا المطياف تتكون صور الشق (المعروفة باسم خطوط الطيف) عند الزوايا θ_n بالنسبة للحزمة الضوئية الأصلية ، وتعطى هذه الزوايا بالعلاقة $n\lambda = d \sin \theta_n$. يعطى الضوء ذو الطول الموجى λ والذى يسقط على محزوز حيود بعده البنى d صورا عند الزوايا θ_n ، حيث n عدد صحيح يمثل رقم الرتبة .

يحتوى الضوء المنبعث من الغازات على موجات ذات أطوال موجيه معينة فقط . ويعطى كل طول موجى خطا أو صورة فى المطياف . ونسمى هذه المجموعة من الخطوط بالطيف الخطى الساطع . ويحتوى الضوء المنبعث من الأجسام الصلبة المتوهجة على مدى مستمر من الأطوال الموجية يظهر فى المطياف على شكل شريط مستمر من الألوان . ويسمى هذا الطيف بالطيف المستمر .

يضع الحيود حاليا حدا معيناً لقدرتنا على تبين رؤية التفاصيل فى الأجهزة البصرية وكقاعدة بسيطة يمكننا القول أنه من المستحيل رؤية تفاصيل أصغر من الطول الموجى للإشعاع المستخدم .

يتم تداخل أشعة أكس باستخدام البلورات . وفى هذه الحالة تعمل مستويات الذرات فى البلورة كأسطح عاكسة . تستخدم أنماط التداخل التى يحصل عليها بهذه الطريقة فى دراسة تركيب البلورات .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى

- ١ - وصف تجربة موجة الماء لتوضيح ظاهرة الحيود .
- ٢ - إثبات علاقة الطور لموجتين متماثلتين متداخلتين تداخلا بناء وتداخلا إتلافيًا .
- ٣ - شرح طريقة الحصول على الحزمتين المترابطتين فى تجربة يونج . توضيح لماذا تتداخل الحزمتان تداخلا بناء وتداخلا إتلافيًا فى نقاط مختلفة باستخدام الرسم التخطيطي . إثبات العلاقة $n\lambda/x = D/d$ لمواضع الهدب الساطعة باستخدام الرسم التخطيطي أيضا .

- ٤ - استخدام نمط التداخل ذى الشق المزدوج لتحديد قيمة λ إذا أعطيت معلومات كافية
- ٥ - وصف تركيب وطريقة استخدام مقياس التداخل لمايكلسون بإيجاز .
- ٦ - شرح سبب الحصول على التداخل باستخدام غشاء أو سفين رقيق . توضيح لماذا تكون هدب التداخل المتكونة باستخدام الضوء الأبيض ملونة . حساب فرق السمك بين هديتين ساطعتين أو مظلمتين متجاورتين في سفين هوائى .
- ٧ - ذكر ما هو محزوز الحيود وتوضيح كيف يستخدم في المطياف ذى محزوز الحيود . شرح لماذا يشاهد السطوع عند الزوايا التى تحقق العلاقة $n\lambda = d \sin \theta_n$. توضيح العلاقة بين n ورتبة الصورة .
- ٨ - شرح ماذا نعنى بخط الطيف . التفرقة بين الطيف الخطى الساطع والطيف المستمر .
- ٩ - وصف ما يحدث لحزمة ضوئية تمر خلال شق عندما يصبح الشق ضيقا جدا . وجه اهتماما خاصا لما يحدث عندما يكون عرض الشق قريبا من λ . وصف أهمية هذه الظاهرة في قدرتنا على رؤية تفاصيل الأجسام .
- ١٠ - شرح مفهوم الكميات المختلفة في علاقة براج . استنتاج هذه العلاقة بدراسة انعكاس الضوء على مستويات البلورة . توضيح لماذا يجب استخدام أشعة أكس وليس الضوء المرئى للحصول على ظواهر التداخل من مستويات البلورة .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

الحيود

التداخل البناء ، التداخل الإتلافي

موجتان متفقتا الطور ، موجتان متفاوئتا الطور ، موجتان متفاوئتا الطور بمقدار 180° أو $\lambda/2$

تجربة الشق المزدوج ليونج ، العلاقة $\Delta = n\lambda$ للنهيات العظمى .

العلاقة $\Delta/d = x/D$

الهدب ذات الرتب الأولى والثانية والصفيرية

مقياس التداخل لمايكلسون

طول المسار الضوئى المكافئ

حلقات نيوتن

محزوز الحيود ، المطياف ذو محزوز الحيود ، العلاقة $n\lambda = d \sin \theta_n$

خط الطيف ، الطيف الخطى ، الطيف المستمر

لا يمكن رؤية التفاصيل الأصغر من λ

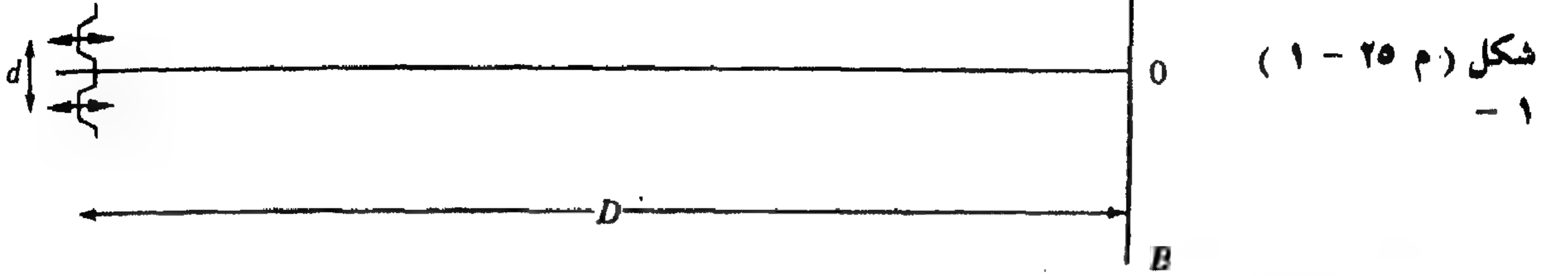
معادلة براج

أسئلة وتخمينات

- ١ - الجهاران الميئان فى الشكل م ٢٥ - ١ متصلان بنفس المذبذب ، لهذا فإنهما يصدران موجتين صوتيتين متماثلتين . تحت أى الشروط يمكنك أن تلاحظ ظاهرة التداخل عندما تمشى على طول الخط AB ؟ ماذا يحدث إذا استبدل الجهاران بمصباحين كهربائيين ؟
- ٢ - لماذا يستحيل الحصول على هدب التداخل فى تجربة الشق المزدوج إذا كان انفصال الشقين أصغر من الطول الموجى للضوء المستخدم ؟
- ٣ - حور تجربة الشق المزدوج ليونج للحصول على تداخل الموجات الصوتية باستخدام مجهر واحد كمصدر للموجات .
- ٤ - لماذا يعكس السطح الزجاجى أو المعدنى الذى يحمل غشاء رقيقا من الزيت فوقه قوس قزح من الألوان عندما ينعكس الضوء الأبيض منه ؟

٥ - توضع الأغشية الرقيقة على سطح العدسات المغلقة لآلات التصوير الثمينة لتقليل الانعكاس . افترض أن العدسة مغلقة بغشاء من مادة شفافة ($n = 1.3$) طول المسار الضوئي المكافئ لها 1250\AA . لماذا يقلل هذا الانعكاس من العدسة ؟ ما هي السمة الهامة الأخرى للغشاء المغلف لكي يكون ذا تأثير كبير ؟ لماذا يبدو الضوء المنعكس من العدسات المغلقة ملونا ؟

مكبرات الصورة

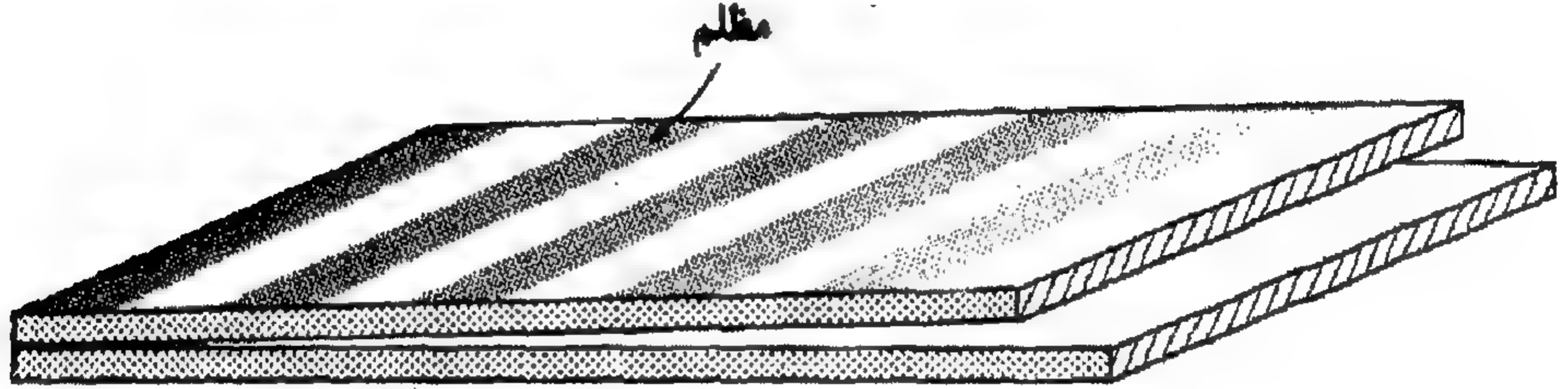


- ٦ - ترسب الأغشية الرقيقة جدا أحيانا على الألواح الزجاجية . ويمكن التحكم في سمك الغشاء بملاحظة تغير لون الضوء الأبيض المنعكس من السطح عندما يزداد سمك الغشاء . اشرح ذلك .
- ٧ - تحلل الأغشية الزيتية الموجودة على سطح الماء الضوء الأبيض إلى ألوانه . هل هناك أى تشابه بين هذه الطريقة لتحليل الضوء الأبيض إلى ألوانه وعمل المنشور ؟ أشرح ذلك .
- ٨ - اشرح العبارة التالية : الفرق في السمك بين هذبتين ساطعتين في نمط تداخل الغشاء الرقيق يساوى صفرا أو λ/n ، حيث λ الطول الموجي للضوء المستخدم ، n معامل انكسار الغشاء .
- ٩ - هل تتحسن قدره تحليل الميكروسكوب عند استخدام الضوء الأزرق بدلا من الضوء الأحمر ؟ اشرح ذلك .
- ١٠ - افترض أن لديك محزوز حيود خواصه مجهولة . كيف يمكنك استخدامه لتحديد الطول الموجي لخط طيف مجهول ؟
- ١١ - خذ قطعتين من الزجاج المسطح (شريحتي ميكروسكوب مثلا) ثم اضغطهما معا بطرق مختلفة وقدر درجة تقارب السطحين بمشاهدة الضوء المتداخل المنعكس . (يمكنك أن ترى نمط التداخل بسهولة في غرفة مضاءة بشرط أن تضغط الشريحتين بدرجة كافية) .
- ١٢ - كيف يمكنك استخدام مقياس التداخل لمايكلسون لقياس معامل انكسار الهواء ؟
- ١٣ - عند النظر إلى عدسة مغلقة لآلة تصوير في الضوء المنعكس تظهر هذه العدسة بنفسجية مع وجود نقبة ضاربة إلى الحمرة (ما جنتا) . فإذا كانت المادة المغلفة هي فلوريد الماغنسيوم ومعامل انكسارها 1.25 . قدر سمك الغشاء المغلف . (ق)

مسائل

- ١ - لنفرض أن المصدرين الصوتيين المبينين في شكل ٢٥ - ١ يبعثان موجتين متماثلتين متفقتي الطور وطولهما الموجي $\lambda = 50\text{ cm}$. عندما يتحرك شخص ما على طول الخط AB سيسمع نهايات. عظمى وصغرى صوتيه . ما هو فرق المسار من المصدرين عند (أ) النقطة 0 ، (ب) النهاية العظمى الأولى بعد 0 ، (ج) النهاية العظمى الثالثة ، (د) النهاية الصغرى الثالثة ؟
- ٢ - طبقا لنص المسألة السابقة يبعث المصدران الصوتيان موجتين متفقتي الطور وطولهما الموجي $\lambda = 50\text{ cm}$. إذا كانت $d = 5.0\text{ m}$ ، $D = 25\text{ m}$ ، فعلى أى بعد من النقطة 0 على الخط AB تقع (أ) النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى (ب) النهاية الصغرى ذات الرتبة الأولى ؟
- ٣ - في تجربة الشق المزدوج كان الانفصال بين الشقين 0.20 cm والمسافة بين الشقين والستار 100 cm . فإذا اتفقنا على أن موضع الهدبة الساطعة المركزية هو الصفر ، اوجد مواضع النهايات العظمى الثلاث الأولى على كلا جانبي النهاية العظمى المركزية . الطول الموجي للضوء المستخدم هو 5000 \AA .
- ٤ - اوجد مواضع النهايات الصغرى الثلاث الأولى في تجربة الشق المزدوج الموصوفة في المسألة ٣ .

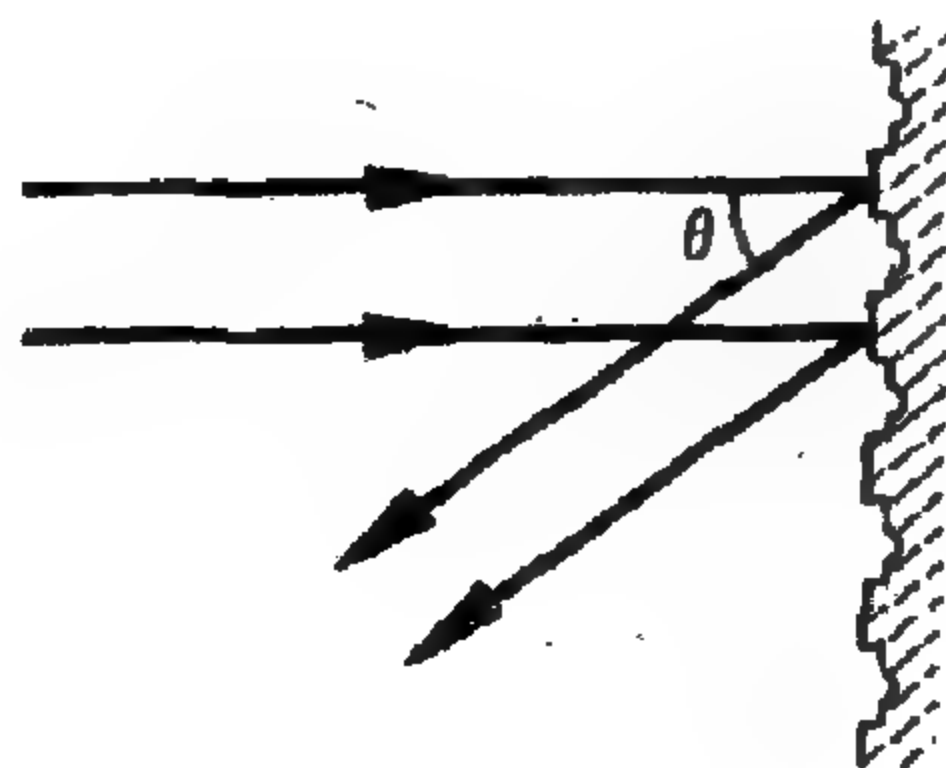
- ٥ - ما هو انفصال الشقين في تجربة الشق المزدوج الذى يعطى نهاية عظمى ذات الرتبة الثانية على بعد 1.00 cm من البقعة الساطعة المركزية ؟ المسافة بين الشقين والستار هي 2.0 m والطول الموجى $\lambda = 500 \text{ nm}$.
- ٦ - عند استخدام الضوء الصوديومى الأصفر ($\lambda = 589 \text{ nm}$) في تجربة الشق المزدوج تقع النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى على بعد 0.030 cm من النهاية العظمى المركزية . وعند استبدال هذا الضوء بآخر طوله الموجى مجهول تتكون النهاية العظمى ذات الرتبة الثانية على بعد 0.040 cm من النهاية العظمى المركزية (أ) ما هو الطول الموجى للضوء الأخير ؟ (ب) في أى منطقة من الطيف يقع هذا الضوء ؟
- ٧ - نظّر شخص عموديا على لوحين زجاجيين متوازيين ومتلامسين ليستقبل ضوءاً طوله الموجى 500 nm (أخضر) منعكس عموديا تقريباً من السطحين . وعند فصل اللوحين يبطء يلاحظ الظلام عند مسافات انفصال معينة بين السطحين . ما هي القيم الأربع الأولى لهذه المسافة ؟ تلميح : يلاحظ الظلام عندما يكون الانفصال بين اللوحين صفراً .
- ٨ - في الشكل م ٢٥ - ٢ توجد الحافتان اليسرتان للوحين في حالة تلامس . ما هي المسافة بين اللوحين بالتقريب عند آخر شريط مظلم على اليمين إذا كان الطول الموجى للضوء الأزرق المستخدم هو $\lambda = 4400 \text{ \AA}$ ؟ افترض أن الحيز بين اللوحين مملوء بالهواء .
- ٩* - ينعكس ضوء أزرق طوله الموجى 400 nm من سفين هوائى موجود بين شريحتين زجاجيتين مستويتين ، وقد وجد أن المسافة بين كل هديتين ساطعتين هي 0.50 cm . ما سمك السفين الهوائى على بعد 4.0 cm من خط تلامس اللوحين ؟ افترض أنك تنظر إلى السفين في حالة السقوط العمودى للضوء .



شكل (٢٥م - ٢)

- ١٠* - كرر المسألة ٩ إذا كان السفين مليئاً بالماء وليس الهواء .
- ١١ - لتعيين خطوة لولب (قلاووظ) على الدقة يستخدم هذا اللولب في تحريك إحدى مرآتي مقياس التداخل لمايكلسون . وقد وجد أن 1 rev من اللولب تؤدي إلى مرور 2023 هدبة ($\lambda = 5460 \text{ \AA}$ ، ضوء أخضر) في مجال الرؤية . ما هي المسافة التي تتحركها المرآة عند دوران اللولب دورة واحدة ؟
- ١٢** - ثبتت في إحدى أرجل مقياس التداخل لمايكلسون أنبوبة زجاجية مفرغة طولها 2.0 cm . سمح للهواء بالدخول ببطء في الأنبوبة فتغير مجال الرؤية من الظلام إلى السطوع إلى الظلام إلى السطوع .. وهكذا عدداً من المرات قدره $2/0$ (أى أن عدد الهدب المارة في مجال الرؤية هو $2/0$) . فإذا كان الطول الموجى للضوء الأصفر المستخدم هو $\lambda = 5790 \text{ \AA}$ ، فما هو معامل انكسار الغاز ؟
- ١٣* - تظهر هدب التداخل في سفين رقيق جداً من البلاستيك عندما يسقط الضوء الأبيض عمودياً عليه ، وكانت المسافة بين هديتين زرقاوين متجاورتين ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$) ط 0.40 cm . إذا كان معامل انكسار البلاستيك هو 1.48 (أ) ما هو الفرق في سمك السفين بين موضعي هاتين الهدبتين ؟ هناك إجابتان ممكنتان . (ب) كيف يمكنك أن تحدد الإجابة الصحيحة ؟
- ١٤* - تغلف عدسات آلات التصوير الغالية بأغلفة غير عاكسة ، وبالتحديد يغلف سطح العدسة بغشاء رقيق من فلوريد الماغنسيوم ($n = 1.25$) . ما هو سمك الغشاء اللازم لكي يحدث تداخلاً إتلافياً بين الضوء المنعكس من سطحي هذه الطبقة الغائبة عندما يستخدم ضوء طوله الموجى 5000 \AA ؟ (اثبت بطريقة كمية أن طبقة من اللوسيت ($n = 1.48$) غير ملائمة لهذا الغرض ؟ تلميح : قارن كمية الضوء المنعكسة من اللوسيت بالكمية المنعكسة من الزجاج) .

- ١٥ - يحتوى محزوز حيود معين على 5000 خط في كل سنتيمتر . عند أى زاوية يوجد الطيف ذو الرتبة الثانية لخط الصوديوم الأصفر (5890 \AA) ؟
- ١٦ - يحتوى محزوز حيود معين على 4000 خط في كل سنتيمتر . ما هو الانفصال الزاوى بين خطى الزئبق (4358 \AA) والأخضر (5461 \AA) في (أ) الطيف ذو الرتبة الأولى ، (ب) الطيف ذو الرتبة الثانية ؟
- ١٧ - عند استخدام محزوز حيود معين وجد أن طيف خط الزئبق (4358 \AA) ذا الرتبة الثانية يقع عند الزاوية 30° تماما . عند أى زاوية يوجد الخط الأصفر (5790 \AA) ذو الرتبة الأولى ؟
- ١٨ - يستخدم محزوز الحيود العاكس عادة في المطياف ذى محزوز الحيود . وهو عبارة عن مرآة يوجد على سطحها مجموعة من الخطوط العاكسة (تكافئ الشقوق في المحزوز المنفذ) .
- ويمثل الشكل ٢٥ - ٣ هذا الموقف حيث d هي المسافة بين مركزي خطين عاكسين متجاورين . اوجد معادلة هذا المحزوز ، أى الزاوية التى توجد عندها النهايات العظمى للتداخل .
- ١٩ - هلى يمكن تصميم محزوز بحيث يقع الخط الأحمر 6000 \AA ذو الرتبة الأولى على الخط البنفسجى 4000 \AA ذو الرتبة الثانية ؟ (ب) وإذا كان ذلك ممكنا ، اشرح كيف يتم ذلك ؟ (ج) وإذا لم يكن ممكنا ، هلى يمكن أن يتم بالنسبة لمجموعة أخرى من الرتب ؟ (د) وإذا أمكن ذلك ، بين كيف يتم ؟
- ٢٠ - استخدم محزوز حيود ($10,000$ خط في السنتيمتر) في خزان كبير من الماء . عند أى الزاوية (فى الماء) يظهر خط الزئبق الأزرق (4358 \AA) ؟
- ٢١ - فى كثير من الأحيان يكون سطح الفواصل المصنوعة من الصلب مموجا ويتكرر هذا التموج كل 10 cm أو حوالى ذلك . وتحت شروط مناسبة يعمل هذا النوع من الحوائط كمحزوز حيود عاكس بالنسبة للموجات الصوتية (انظر المسألة ١٨) . ما هو الطول الموجى للموجات التى تعطى نهاية عظمى ذات الرتبة الأولى عند الزاوية 30° بالنسبة للعمودى فى حالة السقوط العمودى ؟
- ٢٢ - يسقط ضوء طوله الموجى معلوم (600 nm) على شقين (المسافة بينهما مجهولة) مصحوبا بضوء آخر طوله الموجى مجهول . وقد وجد أن النهاية العظمى ذات الرتبة الرابعة للطول الموجى المعلوم تقع على الستار فى نفس موضع النهاية العظمى ذات الرتبة الخامسة للطول الموجى المجهول . ما هو الطول الموجى المجهول ؟
- ٢٣ - غمست مجموعة الشق المزدوج فى الماء ثم أضيئت باستخدام ضوء طوله الموجى 600 nm . وتكون نمط التداخل على ستار يبعد عن الشق المزدوج مسافة قدرها 2.0 m فى نفس خزان الماء . على أى مسافة من النهاية العظمى المركزية تقع النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى على الستار إذا كان انفصال الشقين 0.040 cm ؟
- ٢٤ - انعكست حزمة من أشعة أكس من بلورة Na Cl بواسطة مستويات البلورة التى تبعد عن بعضها البعض مسافة قدرها 2.820 \AA . وكانت زاوية سقوط الانعكاس القوى 40° (أ) ما هى الأطوال الموجية المختلفة لأشعة أكس ؟ (ب) كيف يمكنك تحديد الصحيح من هذه البدائل ؟



شكل (٢٥ - ٣)

الفصل السادس والعشرون

مولد الفيزياء الحديثة

في الفصول السابقة كانت هناك تفرقة كاملة بين الموجات والجسيمات وسنرى في هذا الفصل أنه عند توافر شروط معينة تسلك الجسيمات سلوك الموجات وتسلك الموجات كالجسيمات . لقد فتح اكتشاف هذه الحقائق آفاقا جديدة للفيزيائيين .

سنناقش في هذا الفصل تطوير هذه المفاهيم الجديدة كما سنقدم الأفكار الأساسية لنظرية النسبية ، ثم نطبق هذه المفاهيم على الذرة ونواتها في فصول تالية .

٢٦ - ١ اكتشاف بلانك

بحلول عام ١٩٠٠ شعر كثير من العلماء أن معظم الاكتشافات الضخمة في عالم الفيزياء قد تم بالفعل ولكي نكون واثقين بقيت بعض المسائل المزعجة تنتظر الحل ، ولكن كل القوانين الفيزيائية الأساسية للطبيعة كانت قد وجدت على ما يبدو . ولكن هذا الرأي كان غير صحيح بالمرة كما سنرى في هذا الفصل فكثير من المجالات الشاسعة في السلوك الفيزيائي للطبيعة كان مجهولا حتى ذلك الوقت .

وقد ظهرت أول إشارة إلى أنه ليس كل شيء هادئ في ميدان الفيزياء وذلك بطريقة غير متوقعة عام ١٩٠٠ ، فقد كان ماكس بلانك (١٨٥٨ - ١٩٤٧) مشغولا مع آخرين في محاولة تفسير الإشعاع الذي تصدره الأجسام الساخنة غير العاكسة أو ما تسمى بالأجسام السوداء وقد دلت القياسات الدقيقة التي أجريت على شدة الضوء (وكذا الإشعاع تحت الأحمر وفوق البنفسجي) الصادرة عن أجسام متوهجة بالحرارة ، أن الشدة تتغير مع الطول الموجي كما في الشكل ٢٦ - ١ . يلاحظ أن جزءا صغيرا فقط من الإشعاع الصادر له أطوال موجية في المدى المرئي وأن أغلبه يقع في مدى الأطوال الموجية الخاصة بالإشعاع تحت الأحمر (أو الحرارة) . علاوة على ذلك تدل المنحنيات على أنه بزيادة درجة الحرارة تتزحزح القيمة العظمى للإشعاع من تحت الأحمر نحو المرئي بما يتفق مع تجربتنا من أن جسمًا محمى لدرجة الالبيضاض يكون أسخن مما لو كان في درجة الاحمرار .

لكي نفسر هذه المنحنيات سنجد أننا نتساءل عن نوع الهوائى المرسل الذى يبعث الإشعاع الكهرومغناطيسى من الجسم الساخن . حيث أن الأطوال الموجية المعينة هنا قصيرة جدا لزم أن يكون تردد الشحنات المهتزة كبيرا جدا ، فعند الطول الموجي (1000 nm ، مثلا) يكون لدينا ،

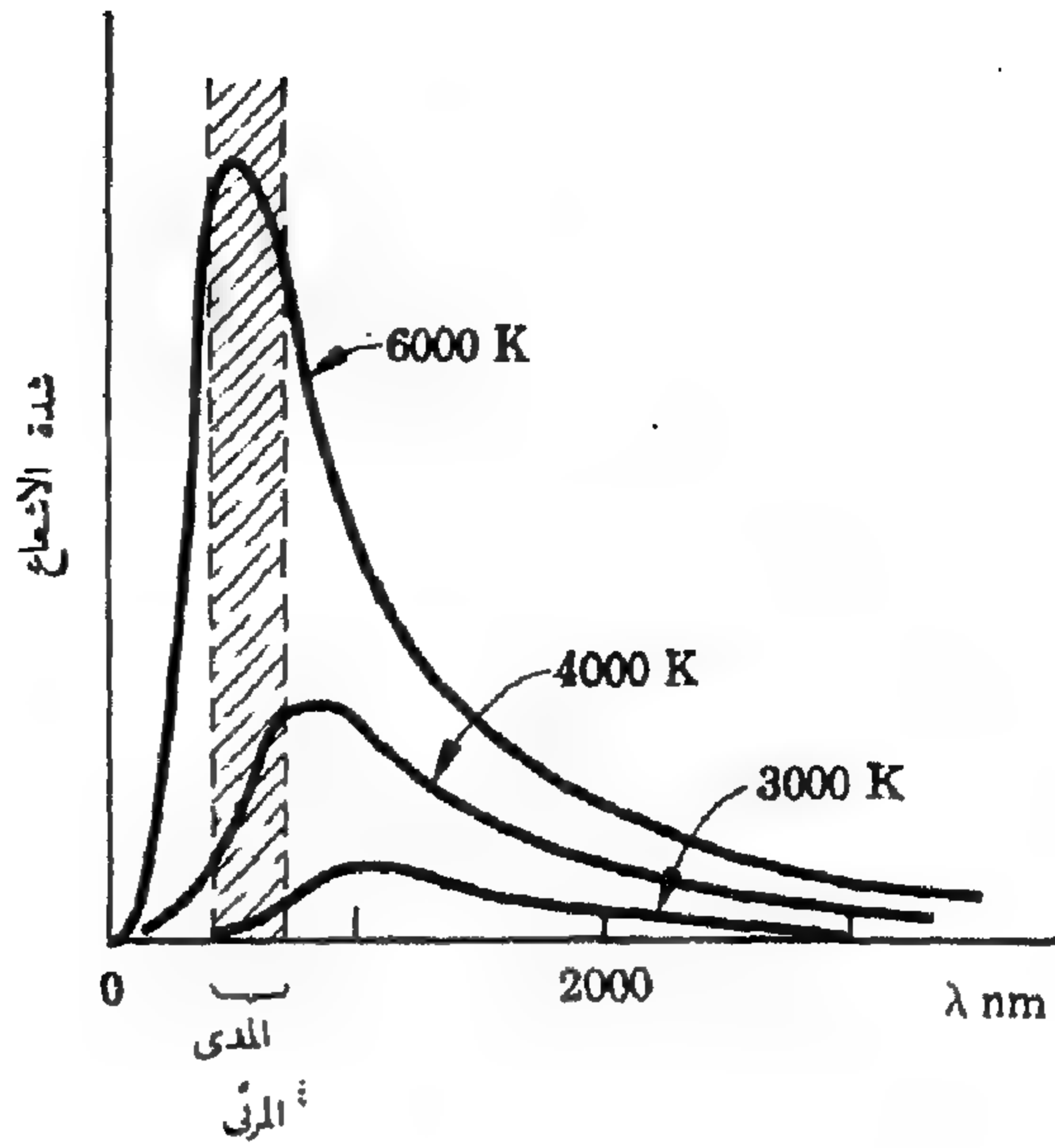
$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \text{التردد}$$

أو

$$\nu = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10^{-6} \text{ m}} \approx 3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

حيث استخدام الرمز ν (حرف « نيو » الاغريقى) للدلالة على التردد بدلا من f ، ولاحظ كبر هذا التردد . ولا يمكن للشحنات أن تتذبذب بهذه السرعة إلا في هوائى على مستوى حجم الذرات ونتيجة لهذا فمن المتوقع أن يصدر الإشعاع ك.م. بواسطة الشحنات المهتزة داخل الذرات والجزيئات التى تكون الجسم الساخن .

شكل (٢٦ - ١)
إشعاع الجسم الأسود . لكى
نتمكن من المقارنة ستكون
درجات الحرارة مناظرة لما
يلى : 6000°K (درجة
حرارة سطح الشمس) ،
 4000°K
(قوس كربونى) ، 3000
 K (مصباح تنجستين
ساخن جدا) .



هناك العديد من النماذج التى يمكن افتراضها لهذه المهتزازات الذرية أو الجزيئية ، فلو كان الجسم مكونا ، على سبيل المثال ، من جزيئات قطبية ثنائية الذرة لأمكن تمثيل الجزيء المهتز كما فى الشكل ٢٦ - ٢ ، فالذرات مرتبطة معا بقوى زهبركية وحيث أن الجزيء قطبى لذا فذراته تحملان شحنات متساوية ومتعاكسة . وحين تقوم الذرات بالتذبذب جيئة وذهابا فإنها بذلك تفعل مثل الشحنات المهتزة على هوائى وبذلك تصدر إشعاعا ك.م. تردده ν_0 ، حيث ν_0 هو التردد الطبيعى لتذبذب نظام الزهبرك الجزيئى . هذه - على الأقل - هى الطريقة التى فكر بها بلانك ومعاصروه .

على أنه اتضح أن كل النظريات التى بنيت على هذا النموذج قد فشلت فى وصف الإشعاع الصادر من الأجسام الساخنة بدقة ، فقد كانت النظريات قادرة على الحصول على نسخ من المنحنيات التى فى الشكل ٢٦ - ١ عند الأطوال الموجية الطويلة فقط بينما أعطت تنبؤات خاطئة تماما عند القيم الصغيرة للأطوال الموجية . وقد تمكن ماكس بلانك من اكتشاف كيف يمكن تعديل النظرية حتى يتم الاتفاق بينها وبين التجربة ومن السهل فهم تعديل بلانك غير أنه من الصعب تبريره . وفى الواقع فإن التبرير الوحيد له هو أنه أعطى الإجابة الصحيحة فى النهاية . ولنر الآن ماذا افترض بلانك ليحصل على التوافق بين النظرية والتجربة .



شكل (٢٦ - ٢)
كلما تذبذب الجزيئ ثنائى
القطبية جيئة وذهابا فإنه
يوحى بأنه يرسل أمواجا
ك.م.

تعتمد سعة الاهتزازة لنظام كالمبين فى الشكل ٢٦ - ٢ - كما نعلم - على طاقة النظام وهذا الأمر صحيح لجميع المذبذبات سواء أكانوا كتلا معلقة فى زهبركات أم بندولا الخ . وفى جميع الحالات كلما زادت طاقة النظام ، كبرت سعة الاهتزازة .

وعلى الرغم من أن تردد الاهتزازة هو دائماً ν_0 ، التردد الطبيعي للاهتزازة ، إلا أن السعة تتزايد بتزايد الطاقة . وقد وجد بلانك أن عليه أن يفترض أن النظام المهتز لا يمكنه الاهتزاز بأية طاقة ، وقد وجد بدلا من ذلك أن :

إفترض بلانك

المهتز ذا التردد الطبيعي ν_0 يمكنه أن يهتز فقط عند طاقات قدرها $h\nu_0$ ، $2h\nu_0$ ، $3h\nu_0$.. وليس عند غيرها *

والكمية h هي ببساطة مقدار ثابت (وهي ليست سعة الاهتزازة) ومقدارها يجب أن يكون

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

إذا أريد أن يتم الاتفاق مع التجربة . ويسمى هذا الثابت الآن بثابت بلانك .

وهذا في الحقيقة افتراض مذهل . إذ أنه يعنى أن المهتز يمكن أن يتذبذب بسعات معينة وليس بغيرها ، فعلى سبيل المثال ، حيث أن الطاقة الكلية للبندول هي mgH حيث H هو الارتفاع الذى يصل إليه ثقل البندول ، فإن بلانك ينص على أن mgH لا يمكن أن تكون إلا $h\nu_0$ ، $2h\nu_0$ ، الخ . ولا شيء بين هذه الكميات .

ولكن ندرك معنى هذا لنعتبر بندولا تردده الطبيعي $\nu_0 = 1 \text{ cps}$ وكتلة ثقل البندول 100 gr وعلى هذا فالارتفاعات التى يصل إليها الثقل عند تأرجحه ستكون ،

$$H_1 = \frac{h\nu_0}{mg} = \frac{(6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(1 \text{ s}^{-1})}{(0.10 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)} = 6.7 \times 10^{-34} \text{ m}$$

$$H_2 = 2H_1 = 13 \times 10^{-34} \text{ m}$$

$$H_3 = 3H_1 = 20 \times 10^{-34} \text{ m}$$

الخ . وليس هناك ارتفاعات عظيمة للذبذبات يمكن ان تقع فى المنتصف .

لاحظ أن الفرق بين الارتفاعات المتتالية للذبذبات هي كما تنبأ بلانك لا تزيد عن 10^{-34} m . وهذا الفرق أضال من أن يقاس ولهذا لا نستطيع أبدا أن نعرف إن كان بلانك محقا بمجرد أن نلاحظ حركة بندول . فالفرافات بين الطاقات المسموحة أصغر من أن تقاس . وقد اتضح أن هذا الأمر صحيح لجميع الأنظمة المهتزة الشائعة

* الطاقة الصفرية غير مسموح بها لأن ذلك يؤدي إلى تعارض مع مبدأ عدم اليقين المذكور فيما بعد .

ومن ثم فنحن لا نستطيع أن نثبت أو ندحض فرض بلانك باستخدام أنظمة مهتزة من الطراز المستخدم في المعامل .

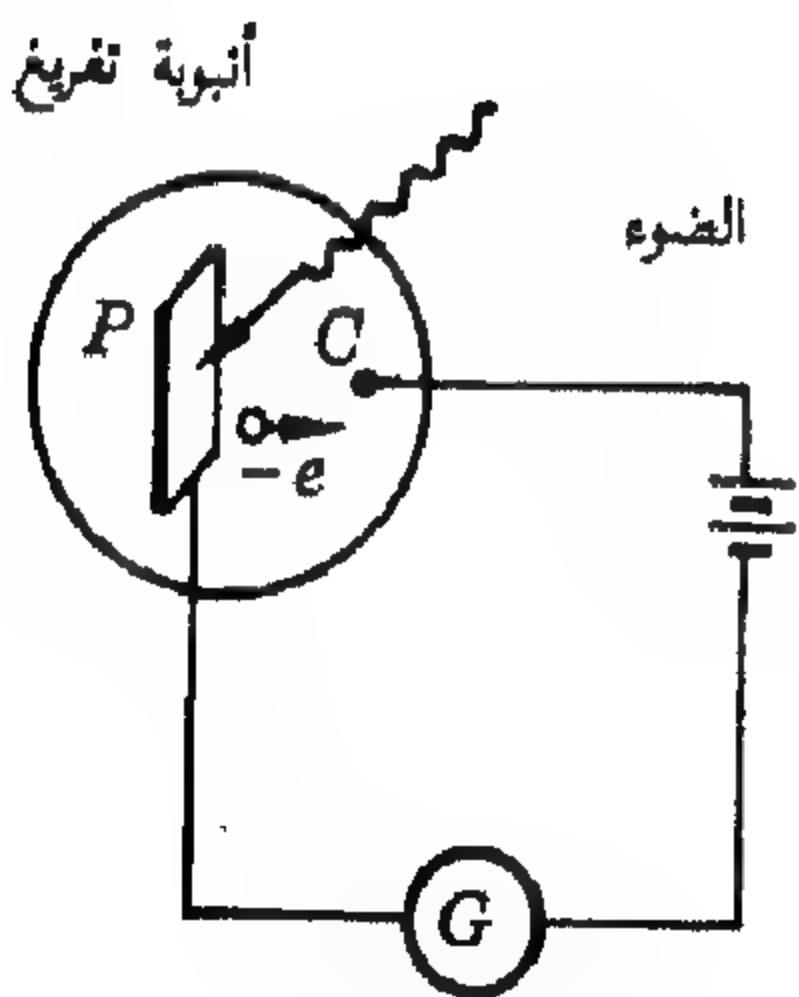
ولذا فقد ووجه بلانك بموقف يثير الحيرة فهو قد حصل على نظرية مناسبة للإشعاع الصادر من جسم ساخن بشرط أن يكون مستعدا لاستخدام الفرض الذى حدد فيما سبق . أما اختبار هذا الفرض بالتجربة على أنظمة مهتزة أخرى فقد بدا مستحيلا ولهذا فقد رأى بلانك ومعاصروه أن تلك النتيجة كانت على درجة من الفضول ولكن صحتها مشكوك فيها . على أننا سنرى أنها قد تثبت صحتها وأهميتها القصوى .

٢٦ - ٢ استعمال أينشتين لمفهوم بلانك

عقب اكتشاف بلانك بخمسة أعوام وجد أن ظاهرة طبيعية أخرى تتضمن ثابت بلانك h . وقد تم هذا الاكتشاف على أيدي ألبرت أينشتين . فقد استطاع - كما سنرى - أن يشرح بالتفصيل تجربة أجراها أولا هاينرش هيرتز . وفى سبيل ذلك افترض أن الضوء له خواص الجسيمات مثلما له خواص الموجات . وقد صار هذا الفرض - كما تحقق فيما بعد - جزءا متكاملًا من الفيزياء الجديدة .

شكل (٢٦ - ٣)

حين يصطدم الضوء باللوح
للخلية الضوئية تبعث منه
الالكترونات .



لقد اكتشف هيرتز عام ١٨٨٧ (هو أيضا أول من أنتج واكتشف أمواج التأثير الكهروضوئى اللاسلكى) أن الضوء يمكن أن يقتلع الكترونات من لوح معدنى ونعرف الآن أن هذه ظاهرة عامة - فالطاقة الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية القصيرة تسبب انبعاثا للالكترونات من الجسم الصلب حين تسقط عليه . وهذا ما يسمى بالتأثير الكهروضوئى .

هناك تجربة لملاحظة التأثير الكهروضوئى وهى مبينة فى الشكل ٢٦ - ٣ . اللوح المعدنى P قد أدخل فى أنبوبة تفريغ زجاجية محكمة ومعة سلك صغير C هو المجمع . توصل هذه العناصر فى دائرة بها بطارية وجلفانومتر كما هو مبين . حين تغطى الأنبوبة بحيث لا يقع عليها أى ضوء فإنه لا يمر أى تيار بالجلفانومتر وذلك لأن جزء الدائرة بين P و C داخل الأنبوبة ليس بينه أى اتصال حيث أن حيز الفراغ بين P و C مقاومة بالضرورة لا نهائية .

إذا سقط ضوء ذو طول موجى قصير على اللوح P ، كالمبين ، فإن الجلفانومتر ينحرف ومن اتجاه سريان التيار يتضح أن الكترونات تغادر اللوح P وتنتقل خلال أنبوبة التفريغ متجهة إلى المجمع C . وقد يظن للوهلة الأولى أن الضوء يقوم بتسخين

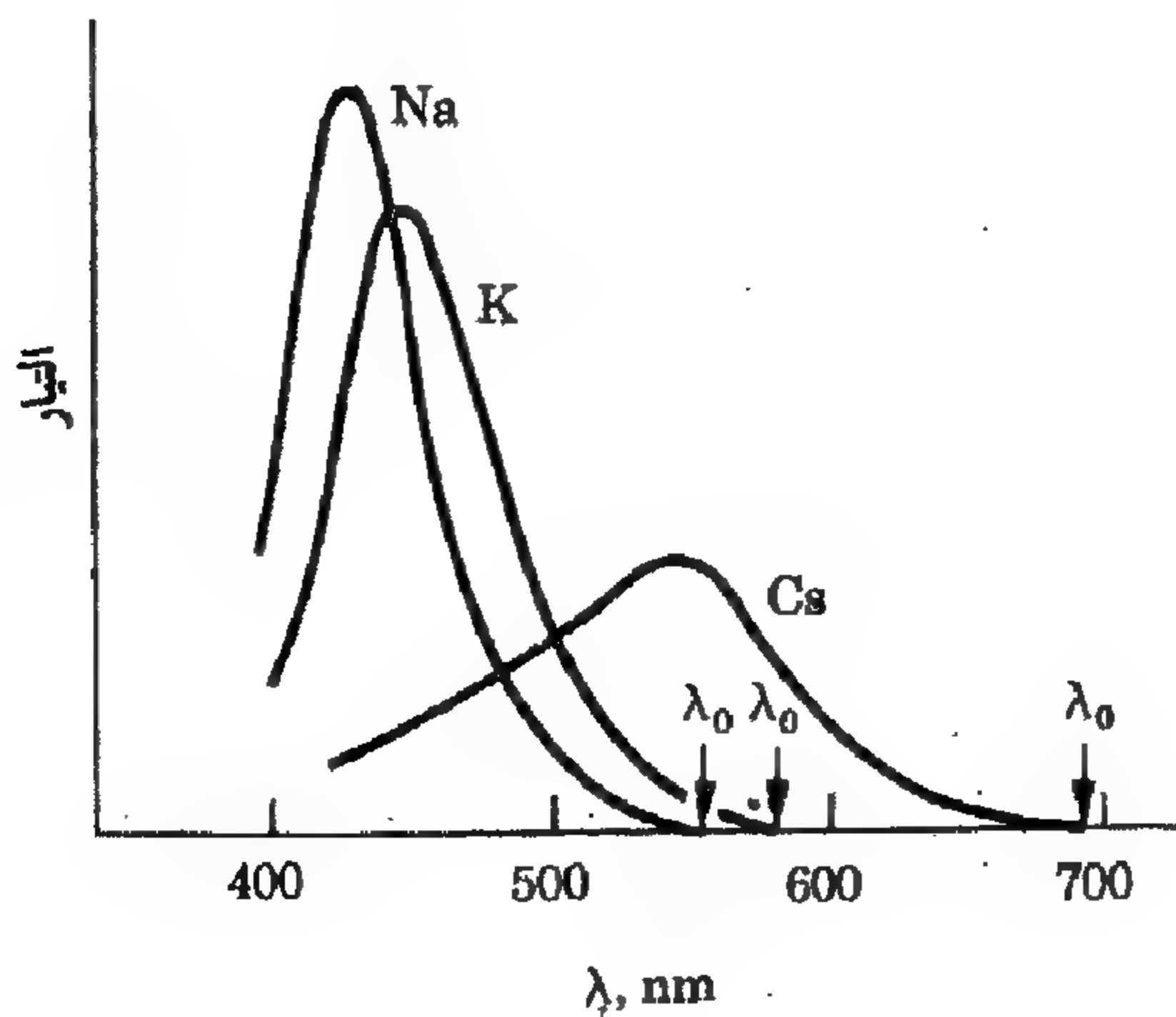
* اقترح أينشتين فى نفس العام ١٩٠٥ نظرية للنسبية وأعطى كذلك أول نظرية مكتملة للحركة البراونية وقد كان عمره وقتها ستة وعشرون عاما ويعمل كاتبا بإدارة براءات الاختراعات .

اللوّح وحين يصير اللّوح ساخنا بدرجة كافية يحدث الانبعاث الترميوني كما في الصمام الثنائي العادي، . على أن الأمر ليس كذلك ، فقد أوضحت تجارب دقيقة أن التيار الالكتروني ينبعث من اللّوح بمجرد أن يصل إليه الضوء بغض النظر عما إذا كان الضوء ضعيفا أم قويا وعما اذا كان اللّوح ثقيلًا أم لا . أي اننا لا نحتاج لأي تسخين .

وقد لوحظ بعد ذلك أن عدد الالكترونات المنبعثة من اللّوح يتناسب طرديا مع شدة الضوء . فلو كانت البطارية التي في الدائرة كبيرة بدرجة كافية لسحب كل الالكترونات المنبعثة إلى المجمع لكان تيار الجلفانومتر متناسبا مباشرة مع شدة الضوء . (ولهذا السبب بالذات يمكن استخدام مثل هذه الخلية الكهروضوئية في قياس شدة الضوء) .

هناك سمة أكثر بريقا وهي المبينة في الشكل ٢٦ - ٤ عندما ترسم العلاقة بين التيار المار في الجلفانومتر مع الطول الموجي للضوء الساقط - مع الاحتفاظ بالشدة ثابتة - فإن الالكترونات لا تنبعث بضوء طوله الموجي أكبر من قيمة محددة هي λ_0 ، وهذا الطول الموجي يسمى الطول الموجي الكهروضوئي المشرف وفي هذه الحالة لن تنبعث أية الكترونات مهما كانت شدة الضوء مادام الطول الموجي أكثر ولو بقدر ضئيل عن λ_0 . ومن جهة أخرى فإن الالكترونات تبدأ في الانبعاث بمجرد إشعال الضوء مهما كان هذا الضوء خافتا طالما أن الطول الموجي له أقصر من λ_0 . تعتمد هذه القيمة الخاصة λ_0 ، وهي الطول الموجي الخارج لانبعاث الكترونات على المادة التي يصنع منها اللّوح .

هناك أيضا ملاحظة شيقة تتضح عند عكس أطراف البطارية في الدائرة التي في الشكل ٢٦ - ٣ ، ففي هذه الحالة ستتنافر الالكترونات مع المجمع . وعندما يكون



شكل (٢٦ - ٤)
يتغير التيار المار في الدائرة في
شكل ٢٦ - ٣ مع الطول
الموجي كما هو مبين هنا ،
حيث سجلت بيانات ثلاثة
معادن مختلفة هي الصوديوم
والبوتاسيوم والسيزيوم ما
معنى قيمة λ_0 المبينة لكل
حالة ؟

فرق الجهد العكسى عبر الأنبوبة V فإن طاقة مقدارها Ve joules ستلزم الالكترون لكى ينتقل (صعدا) من اللوح إلى المجمع حيث e هى الشحنة الالكترونية ، أى أن الالكترون سيصل إلى المجمع فقط حين تكون طاقة حركته بعد قذفه من اللوح من الكبر بحيث أن $\frac{1}{2}mv^2$ تكون مساوية أو أكبر من Ve . ومعنى هذا أن طاقة حركة الالكترون حين يكون عند اللوح يجب أن تكون من الكبر بحيث تحمله صعودا إلى المجمع ذى القطبية المعكوسة .

عند إجراء هذه التجربة سنجد أن هناك جهداً للإيقاف وهو من الكبر بحيث يكفى بالضبط لإيقاف أى الكترونات لكى لا تصل إلى المجمع وهو يرتبط مع الطول الموجى للضوء الساقط بالمعادلة التالية ،

$$V_0e = \frac{A}{\lambda} - B \quad (٢٦ - ١)$$

حيث A و B هى ثوابت عددية : ونعلم مما قيل من قبل أن V_0e تساوى طاقة الحركة التى ينبعث بها أسرع الالكترونات من اللوح . ومن ثم يمكننا أن نكتب ،

$$V_0e = (KE)_{\max}$$

أو ، بعد تعويض هذه الكمية فى المعادلة (٢٦ - ١) وإعادة ترتيب الحدود ،

$$\frac{A}{\lambda} = B + (KE)_{\max} \quad (٢٦ - ٢)$$

لقد بذلت محاولات عديدة لتفسير كل هذه الملاحظات بدلالة الطبيعة الموجية للضوء وباءت جميعها بالفشل إذ أن أى تفسير موجى كان يجابه بعقبتين أساسيتين :
١ - كيف يمكن تخيل موجات تؤدي إلى وجود طول موجى مشرفى ؟ فالضوء الذى له λ أقل قليلا جدا من λ_0 لا يختلف بشكل محسوس عن الضوء الذى له λ أكبر قليلا من λ_0 فى حين أن الأطوال الموجية الأقصر قليلا من λ_0 تجعل الالكترونات تنبعث . أما تلك التى هى أطول قليلا لا تفعل ذلك .

٢ - كيف يمكن لأضعف ضوء ممكن أن يجعل الالكترونات تنبعث بمجرد إشعاله ؟ فالطاقة الضوئية تبدو كما لو كانت تتركز لحظيا عند الكترون واحد وتجعله ينطلق حرا من الجسم الصلب . وهكذا ظهر أن الحاجة ماسة لمعالجة جديدة لتفسير الأثر الكهروضوئى وقد أقدم أينشتين على هذه الخطوة الجسورة والمبدعة .

لقد تمسك أينشتين بأفكار بلانك حول الطاقة المكماة للمذبذبات من أجل حل هذه المعضلة . فقد افترض بلانك ، كما نذكر أن مذبذبا تردده الطبيعى ν_0 يمكن أن يتخذ طاقات محددة فقط ، هى بالتحديد $h\nu_0$ ، $2h\nu_0$ ، .. ، حيث

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$. ويقال أن طاقات المذبذب مكماه وأن الطاقات الممكنة تختلف بكم من الطاقة $h\nu_0$. وقد رأينا فيما سبق أن الأشعاع ك.م. (بما في ذلك الضوء) المنبعث من جسم ساخن يمكن اعتباره مبتعثا من مذبذبات ذرية وجزيئية هي مكونات الجسم .

وقد فكر أينشتين أنه لو كان لهذه المذبذبات أن تصدر إشعاعا بالطريقة التي وصفها بلانك فإن الطاقة يجب أن تبتعث على شكل تفجرات صغيرة أو حزم . وحيث أن الإشعاع ك.م. ، مثلا ، يحمل طاقة ، فإن المذبذب الذي يصدر الضوء يجب أن يرسل طاقة ، ولكن حيث أن المذبذب لا يتخذ سوى طاقات محددة لذا فهو لا يستطيع قذف الطاقة بشكل مستمر وعليه أن يقذفها في تفجرات قيمتها $h\nu_0$ لأن هذه الكمية هي الفاصل بين الطاقات المسموحة للمذبذب .

مفهوم الفوتون

ولكى تتحدد الأمور افترض مذبذبا طاقته $37h\nu_0$ لون أن المذبذب يفقد طاقة عن طريق إشعاع معين فستغير طاقته إلى $36h\nu_0$. وليس الى أية قيمة أخرى بينية وذلك لأن طاقات المذبذب مكماة . وعلى هذا يجب أن يكون المذبذب قد قذف نبضة من الضوء أو أى إشعاع آخر بحيث تكون طاقة النبضة $h\nu_0$. تسمى هذه النبضة من الطاقة الكهرمغناطيسية كم ضوئى أو فوتون . ومن ثم نرى أن هناك بعض التبرير للتفكير فى أن شعاع الضوء يتكون من سلسلة من حزم الطاقة أو الفوتونات ، وأن كل فوتون له من الطاقة ما قيمته $h\nu_0$. وهكذا افترض اينشتين الصفة التالية للضوء :

يتكون شعاع الضوء الذى طوله الموجى λ (وتردد $\nu = c/\lambda$) من فيض من الفوتونات ويحمل كل فوتون طاقة قدرها $h\nu$.

سنرى فى المستقبل كيف أن طاقة الفوتون مرتبطة بتركيب الذرات والجزيئات . ولنطبق الآن نموذج أينشتين للشعاع الضوئى على الأثر الكهرضوئى .

إذا كان الضوء يتكون فعلا من جسيمات ضئيلة من الطاقة ، فإن هذه الكمات أو الفوتونات ستصطدم مع الالكترونات المنفردة مثلما يضبطك شعاع الضوء بالمادة . عندما تكون طاقة الفوتون أكبر من الطاقة اللازمة لاقتلاع الكترون ليتحرر من المادة فإن الالكترونات تبتعث فى نفس اللحظة التى يشغل فيها الضوء ، وعندما تكون طاقة كم الضوء أو الفوتون أقل من تلك القيمة فإنه لن يبتعث أى الكترون مهما كانت شدة الضوء . (إن فرصة اصطدام فوتونين بنفس الالكترون فى نفس اللحظة منعدمة عمليا) . ومن أول وهلة يتضح أن الطاقة اللازمة لاقتلاع الالكترون خارج اللوح هي بالضبط طاقة كم من الضوء له طول موجى مشرفى . ومن ثم فإن دالة الشغل ϕ وهى

كمية الشغل اللازم لاقتلاع الكترون ليصبح حرا خارج الجسم الصلب هي كما ناقشنا في الفصل الثاني والعشرين كما يلي ،

$$\phi = \frac{hc}{\lambda_0} = h\nu_0$$

في حالة ما إذا كان لكم الضوء طاقة أكبر من هذا ، أى عندما تكون λ أصغر من λ_0 فإن الالكترتون لا ينفلت من اللوح فحسب ولكنه سيكتسب طاقة حركة إضافية . ومعنى هذا أن طاقة الفوتون hc/λ ستفقد جزئيا في بذل الشغل ϕ لجعل الالكترتون حرا ويظهر باقى الطاقة كطاقة حركة للالكترتون ومن ثم يمكننا أن نكتب ،

$$\frac{hc}{\lambda} = \phi + \frac{1}{2}mv^2 \quad (٢٦ - ٣) \quad \text{المعادلة الكهرضوئية}$$

لاحظ أن المعادلة (٢٦ - ٣) هي نفسها المعادلة ٢٦ - ٢ . والعلاقة التجريبية بين الطول الموجى وطاقة أسرع الالكترونات تتضح على الفور إذا اعتبر الضوء مكونا من كمات من الطاقة أو فوتونات . علاوة على ذلك فإنه حتى الثوابت التى تنبأت بها المعادلة ٢٦ - ٣ ، وهى المعادلة الكهرضوئية هي نفس الثوابت التى أوجدتها التجربة . نلاحظ أيضا أن الأطوال الموجية الأكبر من λ_0 للضوء لن يكون لديها ما يكفى من الطاقة لتحرير الالكترونات من المادة أى لن تبتعث منها أية فوتو الكترونات وهكذا يصبح لكل تفاصيل الأثر الكهرضوئى معنى اذا ما قبلنا اعتبار موجات الضوء ذات الطول الموجى λ على أنها كمات طاقة أو فوتونات طاقتها $hc/\lambda = h\nu$

مثال توضيحى ٢٦ - ١ عندما يسقط ضوء ذو طول موجى $5 \times 10^{-5} \text{ cm}$ على سطح معين فإن جهد الايقاف يكون 0.6 V . ما هى دالة الشغل لهذه المادة ؟ طريقة الحل . نستفيد مباشرة من المعادلة الكهرضوئية (٢٦ - ٣) ، وباستخدام وحدات SI نجد أن ،

$$\frac{(6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{5 \times 10^{-7} \text{ m}} = \phi + (0.6 \text{ V})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$$

حيث حلت $V_0 e$ محل $\frac{1}{2}mv^2$. والآن بحل المعادلة سعيا وراء ϕ نجد أن ،

$$\phi = 3 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.9 \text{ eV}$$

معامل التحويل بين Joules ، electronvolts هو شحنة الالكترتون كما قد تذكر . ودالة الشغل لمعظم المعادن تكون أكبر من هذه القيمة عدة مرات . على أن دالة الشغل للعديد من الأكاسيد والمركبات المعقدة تقع في حدود هذه الكمية .

٢٦ - ٣. ظاهرة كومبتون

لما كان الضوء وأشعة X كلاهما من الموجات الكهرمغناطيسية ، لذا فإن مفهوم الفوتون يجب أن ينطبق على أشعة X بالمثل ، وقد تمت البرهنة على وجود فوتونات أشعة X على أيدي أ.هـ. كومبتون عام ١٩٢٣ لأول مرة . فقد لاحظ أنه عند سقوط شعاع من أشعة X أحادية اللون ، أى التى بها طول موجى واحد ، على كتلة من الجرافيت فانه يلاحظ استطارة نوعين من أشعة X من على تلك الكتلة بحيث أن معظم هذه الأشعة كان متطابقا فى الطول الموجى مع الأشعة الساقطة به ويمكن تفسير هذا على النحو التالى : يقوم المجال الكهربائى المتذبذب فى الشعاع الساقط بجعل الشحنات التى بداخل الذرات تتذبذب بنفس تردد الموجة . وتعمل هذه الشحنات المهتزة عمل هوائيات تشع موجات لها نفس التردد والطول الموجى ، ومن ثم تكون أشعة X المستطارة عبارة عن موجات أعيد إشعاعها بواسطة الشحنات الذرية المهتزة .

شكل (٢٦ - ٥)
يصطدم الفوتون فى ظاهرة
كومبتون مع إلكترون ، بحيث
يكون هناك حفظ للطاقة
وكمية التحرك .

وبالإضافة إلى هذه الأشعة الشديدة نسبيا من أشعة X المستطارة فإن هناك نوعاً آخر من أشعة X المستطارة ذات طول موجى أطول قليلا . ويتغير الطول الموجى الحقيقى لهذه الأشعة الشاذة بطريقة محكمة وبسيطة نسبيا ، اعتمادا على الزاوية التى تستطار بها . ولم يبد من الممكن تفسير وجود هذه الأشعة باستخدام الصورة الموجية لأشعة X ببساطة .

إلكترون . (λ) فوتون

○

(أ)

(ب)

وقد عرض تفسير بسيط لهذه الظاهرة بواسطة كل من كومبتون وب . ديباي فى وقت واحد . لقد اعتبرا أن الشعاع من أشعة X يحتوى على فوتونات طاقة كل منها $h\nu$. وأن الفوتون يصطدم مع الإلكترون مثلما تصطدم كرتان كما فى الشكل ٢٦ - ٥ ، ثم يقوم الفوتون بإعطاء جزء من طاقته للإلكترون ويرتد مبتعدا كما فى الجزء (ب) من الشكل . وحيث أن طاقة الآن قد أصبحت أقل فإن طوله الموجى يكون أطول .

وقد عولجت المسألة بعد ذلك رياضيا تماما كما تعالج مسألة التصادم المرن لكرتين ، أى أن كلاً من الطاقة وكمية التحرك يجب أن يحفظا ، ولذا ،
الطاقة قبل التصادم = الطاقة بعد التصادم

و كمية التحرك قبل التصادم = كمية التحرك بعد التصادم

يمكن بعد ذلك حل هاتين المعادلتين مباشرة للحصول على الفقد فى طاقة الفوتون كدالة فى الزاوية التى يستطار بها . ويمكن استخدام النتيجة لحساب الطول الموجى للفوتون المستطار وذلك باستخدام حقيقة أن طاقة الفوتون هى hc/λ . وبعد أن يتم هذا سنجد أن الأطوال الموجية المحسوبة للفوتونات المستطارة تنطبق تماما مع القيم

المقاسة . وهذا أيضا يعتبر تأكيدا حاسما على الخواص الجسيمية للأمواج الكهرمغناطيسية .

٢٦ - ٤ فروض النسبية

وضع ألبرت اينشتين في نفس العام (١٩٠٥) الذي قدم فيه نظريته عن التأثير (الكهرضوئي) الخطوط العريضة لنظريته الشهيرة عن النسبية . وهذه النظرية تعتبر مثالا رائعا على الاستنتاجات الهامة من التحليل الواضح للحقائق التجريبية . لقد أدرك أينشتين النصين التاليين على أنهما حقائق تجريبية :

- الفرضان
- ١ - أن سرعة الضوء في الفراغ لها نفس القيمة دائما عند قياسها ($c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$) بغض النظر عن سرعة المصدر الضوئي نفسه أو عن حركة الملاحظ (يفترض بالطبع أن القياسات كانت دقيقة)
 - ٢ - لا يمكن قياس السرعات المطلقة وإنما تتحدد فقط السرعات بالنسبة لجسم آخر .

هذان هما الفرضان الأساسيان لنظرية النسبية لأينشتين .

من المستحيل إثبات هذين الفرضين مباشرة . فهما محط إجماع كل الحقائق التجريبية المعروفة . ونحن نعتبر أنه من الممكن - رغم قلة الاحتمال - أن بعض التجارب قد تؤدي أحيانا إلى دحض أحد هذين الفرضين . ولكنهما مؤيدان بعدد كبير من المحاولات الفاشلة لدحضهما . بالإضافة إلى هذا سنرى أنهما يؤديان إلى استنتاجات هائلة تم التحقق منها بالتجربة .

ربما احتاج الفرض الثاني إلى بعض التفسير . من السهل قياس السرعات النسبية للأجسام فمقياس السرعة في السيارة يدلنا على سرعة حركة السيارة بالنسبة للطريق وهذه السرعة ليست مطلقة ، فالأرض تتحرك نتيجة لدورانها حول محورها وأيضا حول الشمس . ومعرفة هاتين السرعتين يمكن عند الطلب إيجاد سرعة السيارة بالنسبة للشمس .

ولكن الشمس نفسها تتحرك في مجرتنا ، درب التبانة ، ومركز المجرة أيضا يتحرك بالنسبة لنجوم أكثر بعدا ، ويبدو كما لو كان مستحيلا أن نعرف سرعة محددة مطلقة لجسم ما لأن كل شيء يتحرك ويمكننا فقط النص على مقدار سرعة أحد الأجسام بالنسبة لجسم آخر .

تعريف

هناك طريقة أخرى للنص على الفرض الثانى مما يعطينا لمحة عن أهميته الأساسية ، وعادة ما يقدم هذا النص البديل بدلالة مناطات الإسناد . ومناط الإسناد هو أى نظام للإحداثيات تجرى القياسات بالنسبة إليه . فموضع الأريكة مثلا ، وكذا المنضدة والكراسى يمكن وصفه بالنسبة لجدران الغرفة . وتكون الغرفة فى هذه الحالة هى نظام أو مناط الإسناد المستخدم . أو هب أن ذبابة تقف على زجاج سيارة متحركة . يمكننا وصف موضع الذبابة فى السيارة باستخدام جدران السيارة كمناط للإسناد ، ومن ناحية أخرى يمكن وصف موضع سفينة فضاء بالنسبة لمواقع نجوم بعيدة ويكون نظام الإحداثيات المبني على هذه النجوم هو مناط الإسناد .

يمكن النص على الفرض الثانى بدلالة مناطات الإسناد كما يلى :

٢ - تكون قوانين الطبيعة الأساسية هى نفس القوانين* فى جميع مناطات الأسناد المتحركة بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض .

غالبا ما يختصر هذا النص باستخدام اصطلاح مناط الإسناد القصورى . ومناط الإسناد القصورى هو نظام للإحداثيات ينطبق فيه قانون القصور : يبقى الجسم الساكن فى حالة سكون مالم تؤثر عليه قوة غير متوازنة فتجعله يتسارع ، كما تنطبق أيضا قوانين الطبيعة الأخرى على هذا النظام . ويمكن بتقريب جيد اعتبار أن جميع نظم الإسناد المتحركة بسرعة ثابتة بالنسبة لنجوم بعيدة على أنها مناطات قصورية .

٢ - تكون قوانين الطبيعة الأساسية هى نفسها فى جميع مناطات الإسناد القصورية

يمكنك فهم العلاقة بين هذين النصين المختلفين للفرض الثانى وذلك باعتبار ما يلى . حين نقول أن السرعات النسبية هى فقط التى يمكن قياسها فإنما نفترض انعدام الانحياز فى مناطات الإسناد . سفينة الفضاء مثلا قد تكون متجهة إلى القمر بسرعة تبلغ 10^5 km/day بالنسبة للقمر . ومن الصحيح أن القمر أيضا يتجه نحو السفينة بسرعة 10^5 km/day بالنسبة للسفينة . فحقيقة أن أحدهما يتحرك بالنسبة للآخر من السهل توكيدها ولكن كلا النصين متكافئان ولا يمكن أن يقال على أى من الجسمين أنه فى حالة سكون .

افترض ، مع ذلك ، أن أحد قوانين الطبيعة يعتمد على سرعة مناط الإسناد وأن الأشخاص الموجودين بداخل سفينة الفضاء يمكنهم الاستفادة من هذا القانون للحصول

* يمكن التعبير عن قانون نيوتن الثانى مثلا بأنه $F = ma$ فى أى من المناطات ولكننا سنرى مع ذلك أن m (أو F أو a) قد لا يكون لها نفس القيمة فى كل مناط .

على مؤشر لسرعتهم . كما يستطيع الأشخاص الموجودون فوق القمر فعل نفس الشيء . ستكون السرعتان المقاستان مختلفتين . ونتيجة لهذا سيكونون قادرين على أكثر من مجرد قياس سرعتهم النسبية ، ففي الواقع سيتمكنهم القانون من إقامة تسجيل مطلق للسرعات . ولكن هذا يناقض الفرض الثاني ، ولذا فإننا نستنتج أن كل قوانين الطبيعة يجب أن تكون هي نفسها في جميع مناطات الإسناد القصورية .

٢٦ - ٥ ، هي الحد الأعلى للسرعة

لو أننا صدقنا أينشتين لأمكننا أن نثبت بالمنطق وحده أن :

لا يمكن تعجيل جسم مادي الى سرعات تزيد على سرعة الضوء في الفراغ .

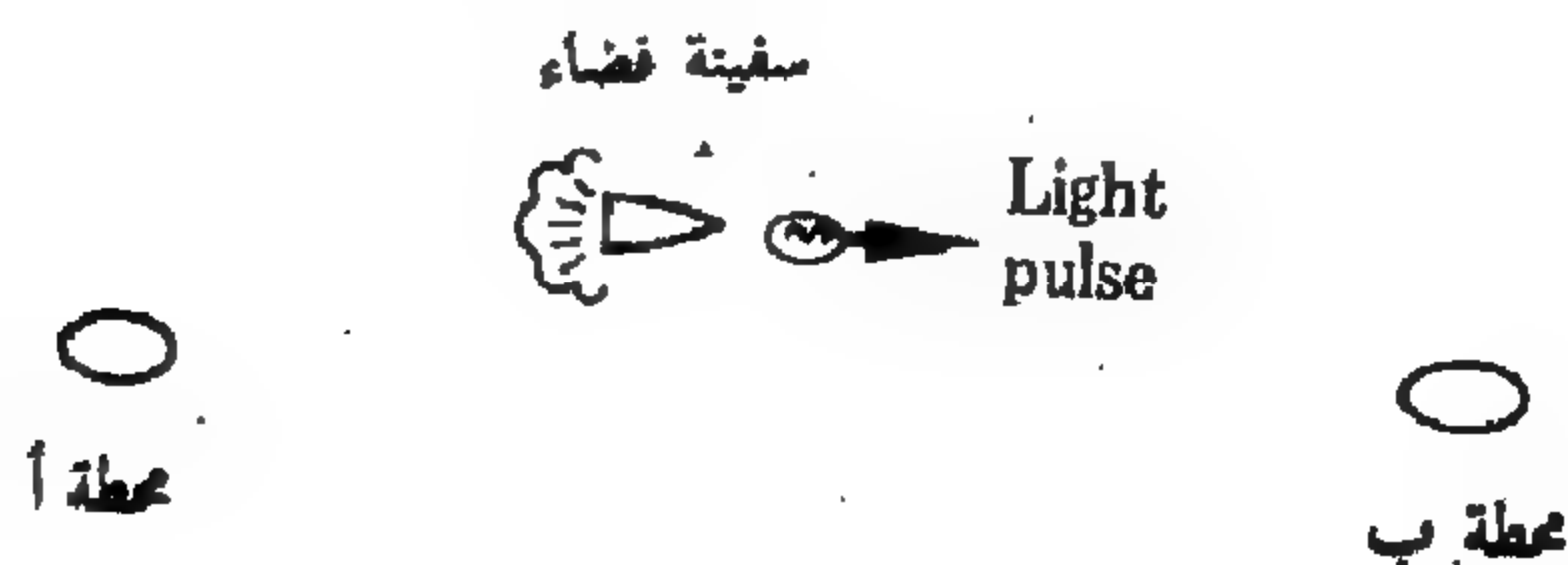
يمكن تصوير صحة هذا النص بسهولة بالطريقة البسيطة التالية . ستثبت بالطريقة المسماة إثبات الخطأ وفيها ندحض اقتراحا ما (بأن جسما يمكنه الانتقال بسرعة أكبر من c في هذه الحالة) . وذلك ببيان أن هذا الاقتراح يؤدي إلى نتيجة معروفة وزائفة (وهي أن المشاهد سيقيس قيمة مختلفة عن c لسرعة الضوء في هذه الحالة) .

افترض أن لدينا محطتين في الفضاء هما A و B كما في الشكل ٢٦ - ٦ . يقوم الملاحظون القصوريون عند A و B بأمر ركاب سفينة الفضاء باتباع خط مستقيم لمسارهم بين A و B ، وعلى السفينة أن تنتقل بأقصى سرعة ثابتة لها وأن ترسل إشارة ضوئية من مقدمتها نحو B عندما تمر بالمحطة A . من الطبيعي أن كلا من A و B وهما شركاء في العمل سيتمكنهم تحديد سرعة السفينة وذلك بتوقيت طيرانها من A الى B . والآن لتتقدم بالفرض الزائف بأنهم وجدوا أن سرعة السفينة هي $2c$.

لقد أرسلت السفينة نبضة ضوئية عند مرورها بالمحطة A ، وحيث أن قوانين الطبيعة يجب أن تنطبق على الملاحظين القصوريين الثلاثة جميعهم (A و B و الشخص الراكب في السفينة) ، لذا وجب أن تسلك نبضة الضوء بطريقة طبيعية بالنسبة لكل منهم ، وبشكل خاص يجب أن تسبق نبضة الضوء السفينة وأن تصل إلى المحطة B قبل السفينة . ولهذا فإن A و B وهما تعمالان معا ستجدان أن نبضة الضوء تتحرك أسرع من السفينة . ولكنهما قاسا سرعة السفينة ووجدوا أنها $2c$ ، وعلى

شكل (٢٦ - ٦)

ما هي السرعة القصوى التي
تمر بها السفينة بين المحطتين
الفضائيتين ؟



ذلك فيجب أن تكون سرعة النبضة أكبر من $2c$ وهذه نتيجة مستحيلة تماماً لأنها تتنافى مع حقيقة أن كل الملاحظين سيحصلون على سرعة للضوء مقدارها c فقط . ومن ثم نستنتج أن اقتراحنا الأصلي كان زائفاً ، وأن سفينة الفضاء لا يمكن أن تتحرك بين A و B بسرعة مقدارها $2c$.

ولابد أن تؤدي هذه التجربة دائماً إلى هذا التناقض طالما أصررنا على أن سرعة السفينة تربو على c . وعليه فإننا نستنتج أن سفينة الفضاء لا يمكن أن تزيد سرعتها عن سرعة الضوء المقاسة وهي c . ويمكن بالفعل التماهى في هذا الخط من التحليل ليشمل كل الأجسام المادية والنبضات التي تحمل الطاقة . ويمكن نتيجة لهذا النص على أن :

توجد سرعة محدودة

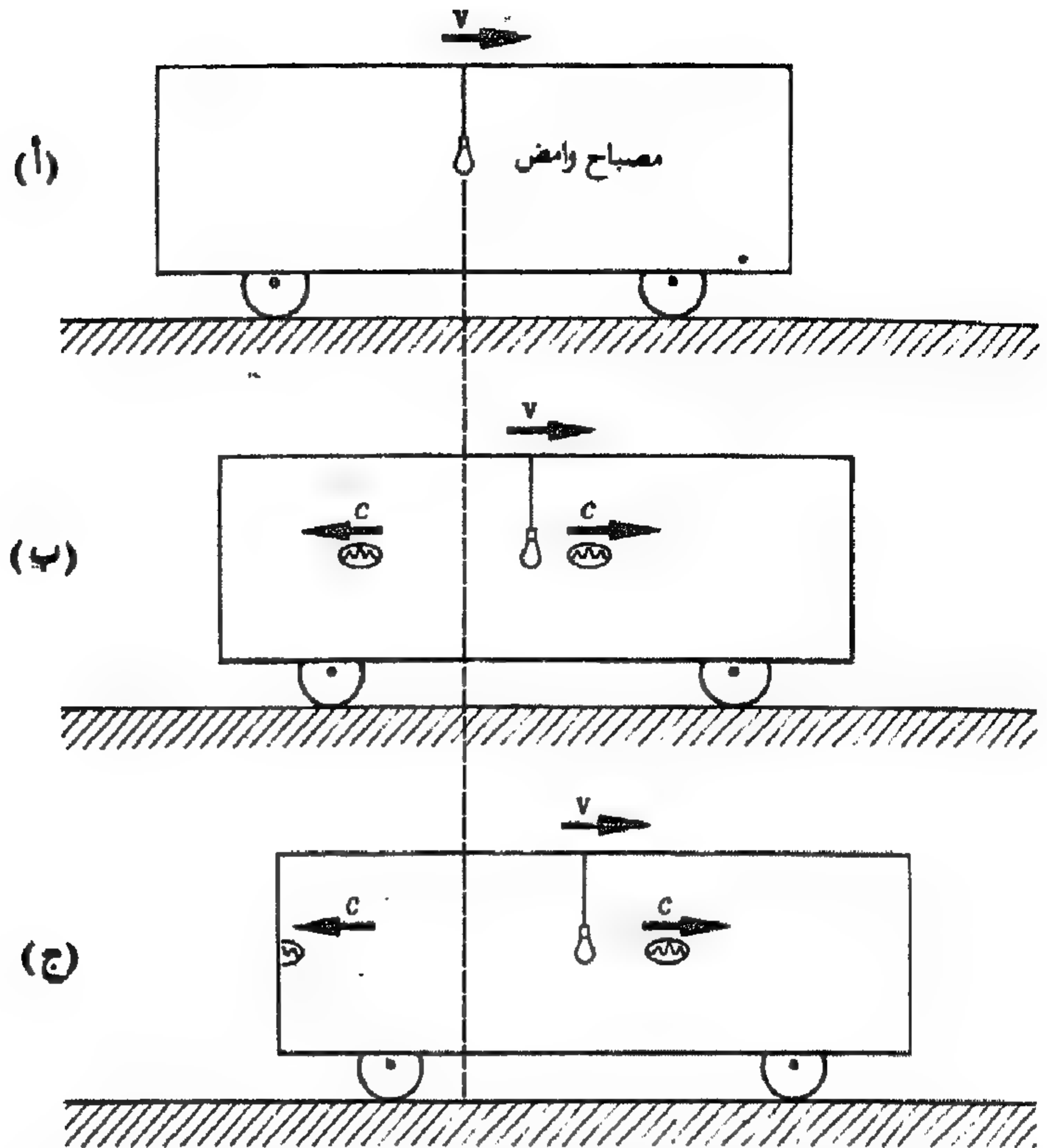
لا يمكن لأى شيء يحمل طاقة أن يعجل لسرعة الضوء .

وسنرى كلما تقدمنا أن هذه النتيجة لنظرية أينشتاين قد اختبرت بعناية أكثر من مرة وأنها وجدت صحيحة في كل اختبار .

٢٦ - ٦ التزامن

سنرى في هذا القسم أن الفروض الأساسية للنسبية تجبرنا على استنتاج أن الأحداث التي قد تقع في زمن واحد في أحد مناطات الإسناد القصورية قد لا تحدث في زمن واحد في مناط آخر . ولبيان ذلك سنلجأ إلى تدبير تجربة ذهنية سيكون أساس تجربتنا هو تقدم نبضة ضوء كما يسجلها ملاحظان قصوريان .

افترض أن عربة صندوقية تنتقل إلى اليمين بسرعة ثابتة وكبيرة جداً في الشكل ٢٦ - ٧ أ . هناك مصباح وامض سريع مثبت في منتصف العربة تماماً وله عاكسان بحيث يرسل بالضوء يمينا ويساراً عند اشتعاله . وقد زودت العربة بخلايا كهروضوئية عند كل طرف حتى يمكن لرجل بداخل العربة أن يكتشف متى تصل نبضة الضوء إلى كل من نهايتي . العربة هناك أيضاً امرأة ساكنة على الأرض تقوم باستخدام نبيطة عبقرية لكي تقيس تقدم نبضتي الضوء . لاحظ أن كلا الملاحظين موجود في مناط إسناد قصورى (أحدهما عربة صندوقية متحركة والآخر الأرض) . ولذا فعليهما أن يريا نبضات الضوء تسلك « بشكل طبيعي » أثناء وجود كل منهما في مناط الإسناد الخاص به . من الطبيعي أن المرأة التي على الأرض سيكون طبيعياً بالنسبة لها أن تنتقل نبضات الضوء بسرعة c إلى اليمين وإلى اليسار من المصباح الوامض ، أما الرجل الموجود بالعربة « فالطبيعي » بالنسبة له أن تصل نبضتا الضوء إلى المكشافين عند طرفي العربة في وقت واحد .



شكل (٢٦ - ٧)
على عكس الملاحظ
القصورى فى المناط المتحرك .
فإن الملاحظ الساكن على
الأرض لا يرى نبضات الضوء
وهى تصطدم بنهايتى العربة
فى وقت واحد .

لنعتبر أولاً الرجل الذى بالعربة . التجربة بالنسبة له بسيطة للغاية فالمصباح ساكن بالنسبة له ومثبت فى منتصف العربة . حين يشتعل المصباح تنتقل نبضتان مسافتين متساويتين إلى طرفى العربة فى زمنين متساويين (تذكر أنه بالنسبة للرجل ستكون التجربة هى نفسها سواء تحركت العربة أم لا لأنه لا يستطيع معرفة ذلك) . ومن ثم تصل نبضتا الضوء إلى طرفى العربة فى زمن واحد .

ولنعتبر الآن كيف ترى المرأة التى على الأرض هذه التجربة . توضح قياساتها أن التجربة تسير بشكل طبيعى (بالنسبة لها) وأن الموقف يتطور كما فى الجزئين (ب) و (ج) من الشكل ٢٦ - ٧ . لاحظ أن النبضات تقطع مسافات متساوية فى أزمنة متساوية إلى اليمين وإلى اليسار . ولكن حيث أن العربة تتحرك إلى اليمين فإن المسافة إلى الطرف الأيسر للعربة تصبح أقصر . وينتج عن ذلك أن الملاحظة الساكنة على الأرض ستسجل أن النبضة التى إلى اليسار ستصل إلى طرف العربة قبل أن تصل النبضة الأخرى إلى الطرف المقابل وعلى هذا لن تصل نبضتا الضوء إلى طرفى العربة فى زمن واحد .

علينا إذن أن نستنتج أن الزمن ليس بالكمية البسيطة لأن :
الأحداث التى تقع فى زمن واحد فى أحد مناطات الإسناد القصورية
قد لا تحدث فى زمن واحد فى مناط آخر

وتبين اعتبارات أبعد من هذه أن هذا الموقف يوجد فقط عندما تحدث عمليتان عند موقعين مختلفين . ففي الحالة الراهنة تحدث إحدى العمليات عند طرف العربة الأول بينما تحدث الأخرى عند الطرف المقابل .

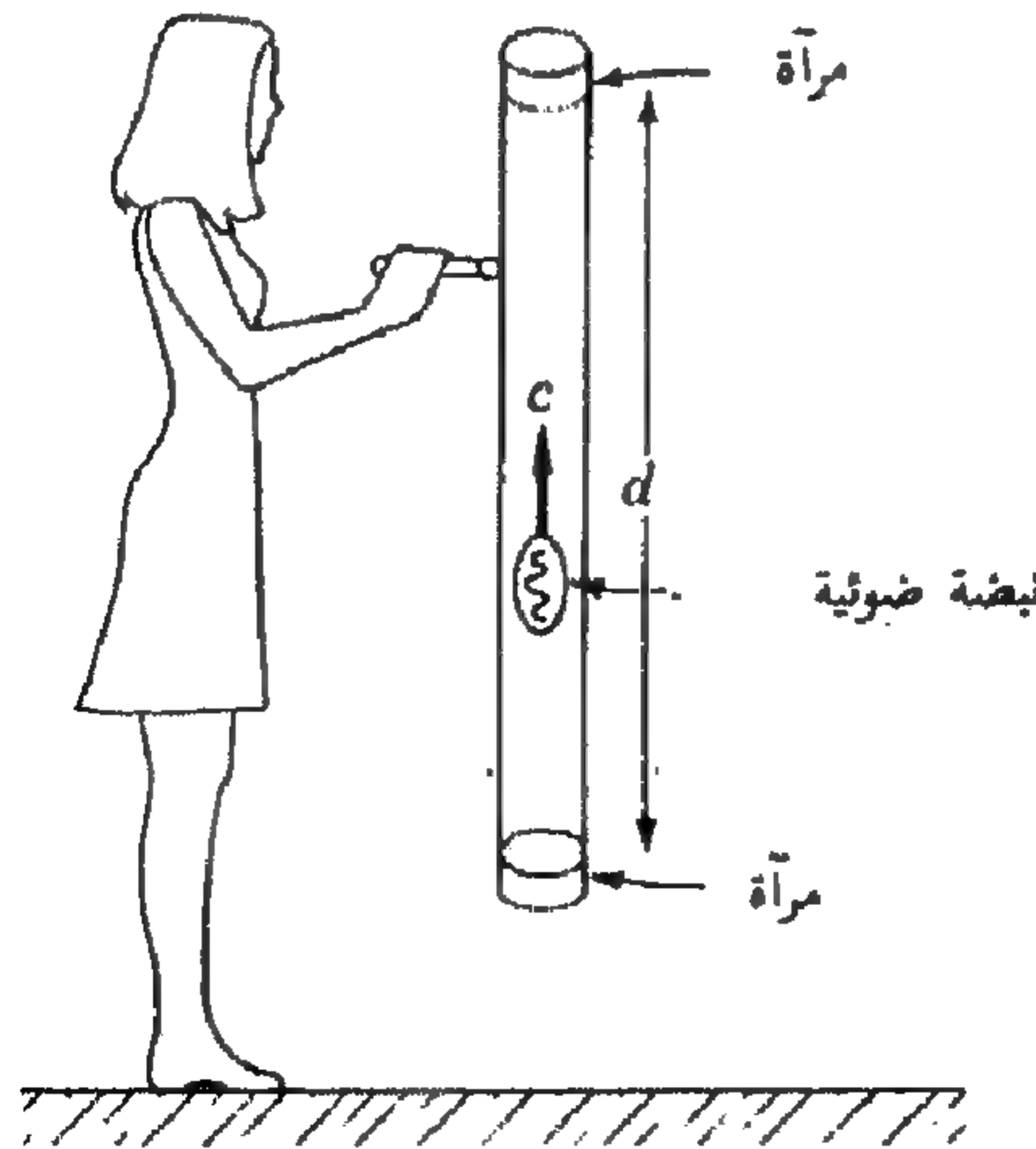
٢٦ - ٧ الساعات المتحركة تكون أبطأ في حركتها

ربما تكون قد ارتبت من نتائج القسم السابق أن الضوء ليس بالكمية البسيطة وقد أشار أينشتين إلى هذا حين أوضح أن الساعة تدق بطريقة مختلفة للشخص الذي يحملها ولشخص يمر بجوارها ، وسنصور هذه الظاهرة بتجربة ذهنية باستخدام ساعة خاصة جدا على الرغم من أن أينشتين قد أثبت صحة هذه الظاهرة بشكل عام .

اعتبر الساعة وقد أمسكت بها المرأة التي في الشكل ٢٦ - ٨ . تتكون هذه الساعة من نبضة ضوء تتحرك جيئة وذهابا بين مرآتين عاكستين مثبتتين في أنبوبة تفريغ أسطوانية . كلما وصلت نبضة الضوء إلى المرآة السفلى فإنها تدق معلنة وحدة من وحدات الزمن والتي ستطلق عليها « طقة » ، فلو كان طول الأنبوبة 1.5 m لكان من السهل على المرأة أن تحسب الآتي :

$$10^{-8} \text{ s} = \frac{3.0 \text{ m}}{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}} = \frac{2d}{c} = \text{طقة واحدة}$$

افترض الآن أن عدة نسخ قد صنعت من هذه الساعة وأن إحداها قد استعملها رجل في سفينة فضاء . تنظر المرأة ومعها ساعة مشابهة من نافذة معملها (الكائن في سفينة فضاء أخرى) فترى الرجل ينطلق بجوارها بسرعة v ويسرها أن تجده يستعمل ساعة شبيهة بساعتها ، ويجرى بينها وبين الرجل اتصال لاسلكي فيخبرها أن الساعة تدور بشكل جيد وأنها تصدر طقة كالمعتاد كل $2d/c$ ثانية .



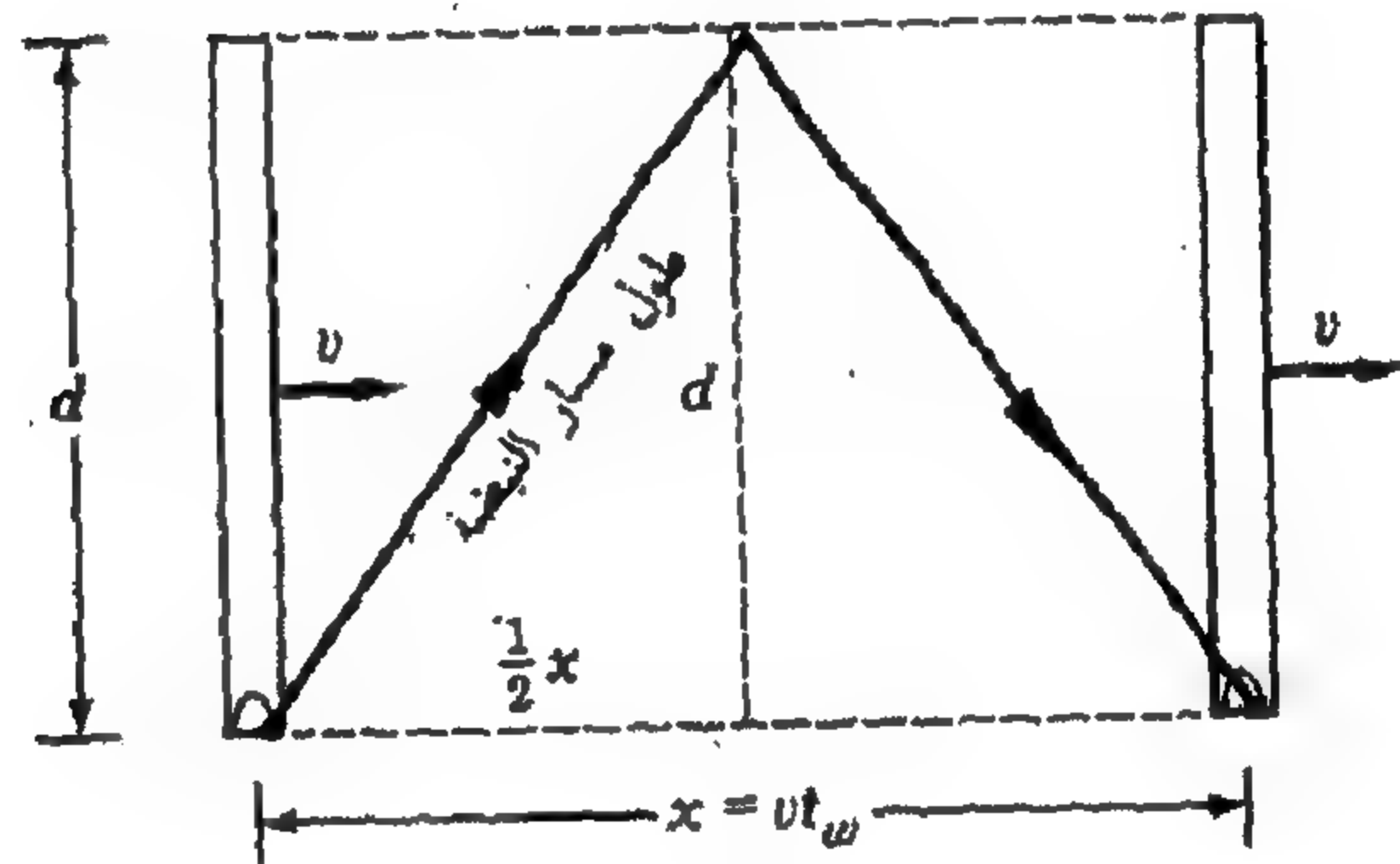
شكل (٢٦ - ٨)
تسجل الساعة الضوئية
« طقة » واحدة كلما
انعكست نبضة الضوء من
المرآة السفلى .

وبعد أن فكرت المرأة برهة اكتشفت أن هناك شيئا غريبا في الأمر ، واستنتجت أن ساعة الرجل لا بد وأن تتقطع الزمن أبطأ من ساعتها ، ويمكن فهم تحليلها على النحو التالي :

بما أن ساعة الرجل تعمل بشكل مضبوط بالنسبة له ، فهي تعلم أنها ستدور بالطريقة المبينة في الشكل ٢٦ - ٩ حيث نرى موقع الساعة عند طقتين متتاليتين . لاحظ أن المرأة تعلم أن نبضة الضوء تتحرك على المسار المبين . وعلى الرغم من أن الرجل يرى النبضة وهي تتحرك في خط مستقيم واحد إلى أعلى وإلى أسفل إلا أن المرأة تعلم أن النبضة تتحرك إلى اليمين أيضا بسبب حركة الساعة إلى اليمين* . وتقوم المرأة بحساب الزمن بين طقتين على ساعة الرجل كما يلي .

تتحرك النبضة - حسب رأى المرأة - مسافة هو طول الخط الملون في الشكل ومن نظرية فيثاغورس ومن أبعاد الشكل نرى أن

$$\text{طول مسار النبضة} = 2\sqrt{d^2 + (\frac{1}{2}x)^2}$$



شكل (٢٦ - ٩)
تنتقل نبضة الضوء في الساعة
المتحركة مسافة أكبر من 2d
خلال فترة طاقة واحدة ،
ويكون طول مسار نبضة
الضوء هو $2\sqrt{d^2 + (\frac{1}{2}vt_w)^2}$

(١)

ولكن المرأة تعلم أن ساعة الرجل تنتقل أمامها بسرعة v ، وأنه حسب ساعتها هي سيستغرق زمن t_w للانتقال من أحد الوضعين إلى الآخر وعلى ذلك فهي تعلم أن $x = vt_w$

نتيجة لهذا - وحسب رأى المرأة - فإن ،

$$\text{طول مسار النبضة} = 2\sqrt{d^2 + (\frac{1}{2}vt_w)^2}$$

* قد تتساءل : من منهما على حق ؟ كلاهما ، كما سنرى حالاً . كما منهما يصف الموقف بشكل صحيح كما هو مقاس ل إطار الإسناد الخاص به

تعرف المرأة أيضاً أن نبضة الضوء تنتقل دائماً في الفراغ بسرعة c وبناء عليه يكون الزمن اللازم لتغير الوضع المبين في الشكل هو ،

$$t_w = \frac{\text{طول مسار النبضة}}{c} = \frac{2\sqrt{d^2 + (\frac{1}{2}vt_w)^2}}{c}$$

يمكننا أن نحل المعادلة سعياً وراء t_w ونجد (بعد تربيع الطرفين وترتيب الحدود ثم أخذ الجذر التربيعي

$$t_w = \frac{2d/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

ولكننا ندرك أن $2d/c$ هي الزمن الذي يصر الرجل على أن تستغرقه ساعته لتصدر طاقة واحدة ، ومن ثم تكون لدينا النتيجة التالية :

$$\left(\frac{\text{الفترة الزمنية على الساعة المتحركة}}{\text{الفترة الزمنية على الساعة الساكنة}} \right) = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \right) \left(\frac{\text{الفترة الزمنية على الساعة الساكنة}}{\text{الفترة الزمنية على الساعة المتحركة}} \right)$$

افترض مثلاً أن الرجل يتحرك بسرعة مقدارها $0.75c$ أمام المرأة ، فتكون قيمة المقدار $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ هي 0.66 ومقلوبها 1.51 ، وتحت هذه الظروف ستصدر ساعة المرأة 1.51 طاقة خلال الزمن الذي تعلم فيه أن ساعة الرجل تصدر طقه واحدة فقط . وكما نرى فإن الساعة المتحركة تسجل الزمن أبطأ من الساعة الثابتة .

تسجل الساعة المتحركة بسرعة v زمناً قدره $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ثانية خلال زمن قدره 1 ثانية على ساعة ساكنة .

تتصل المرأة لاسلكياً بالرجل بعد أن وصلت إلى هذه النتيجة غير المتوقعة وتعلن له أنها قد اكتشفت أن الساعات المتحركة تطقطق أبطأ من الساعات الساكنة . وقبل أن تقص عليه التفاصيل أخبرها أنه كان يفكر في نفس المشكلة وأنه اكتشف أن ساعتها ، و هي التي كانت تتحرك بالنسبة إليه بسرعة v كانت تطقطق أبطأ من ساعته . ثم تذكر الإثنان أن الحركة النسبية فقط هي التي لها معنى وأن كلتا الساعتين ليستا خاصيتين .

تمدد الزمن

ستبدو أية ساعة متحركة بالنسبة لمشاهد على أنها تطقطق أبطأ إذا قورنت بساعة ساكنة بالنسبة للمشاهد .

تسمى هذه الظاهرة **تمدد الزمن** لأن الزمن يمتد كما نقول بالنسبة للساعة المتحركة . تنطبق هذه النتيجة المذهلة على أية آلية توقيت أيا كان تعقيدها ، فلو كان

الرجل يستخدم معدل نمو الطحالب على أنه أداة التوقيت لوجدت المرأة أن معدل نمو الطحالب يبطئ عند حركتها . وحتى تقادم جسم الانسان سيبطئ عند الحركة بسرعات عالية كما سنرى في أحد الأمثلة التوضيحية التالية .

على أن هناك نقطة واحدة يجب علينا تذكرها وهي أن الساعة الجيدة ستبدو دائما طبيعية للشخص الساكن بالنسبة للساعة ، أما بالنسبة للأشخاص المتحركين بسرعة أمام الساعة فسيصدقون أن الساعة تطلق الوقت أبطأ . وعلى الرغم من هذا ستظل الساعة تعلن الوقت بشكل صحيح عندما ينظر إليها مشاهد ساكن بالنسبة إليها .

مثال توضيحي ٢٦ - ٢ . يعتبر قياس المدة التي تحياها الجسيمات غير المستقرة أحد الأمثلة المذهلة على تمدد الزمن . فالجسم المسمى بيون مثالا يحيا في المتوسط حوالي 1.8×10^{-8} s فقط حين يكون ساكنا في المعمل وحينئذ يتغير إلى صورة أخرى . ما هي المدة التي يحياها مثل هذا الجسم إذا أطلق من المعمل بسرعة تبلغ $0.95c$ ؟

طريقة الحل يتحرك البيون في الحالة الثانية بسرعة مقدارها $0.95c$ بالنسبة للمشاهدين في المعمل ولا بد أن التجارب توضح أن الساعة الداخلية للبيون ، وهي التي تحكم طول حياته ، يجب أن تبطئ بسبب الحركة . ويكون الزمن 1.8×10^{-8} s الذي تسجله الساعة المتحركة حين يسجل بساعة المعمل هو كما يلي .

$$\frac{1.8 \times 10^{-8} s}{\sqrt{1 - (0.95)^2}} = \text{الحياة حسب ساعة المعمل}$$

وهذا المقدار يساوي 5.76×10^{-8} s . وكما نرى فإن البيون المتحرك سيحيا فترة أطول ثلاث مرات من البيون الساكن وقد أجريت هذه التجربة وتجارب أخرى متنوعة واتفقت نتائج التجربة مع النتائج المحسوبة .

مثال توضيحي ٢٦ - ٣ إن أقرب نجم إلى مجموعتنا الشمسية هو الفا قنطورس ويبعد مسافة 4.3×10^{16} m . وحيث أن الضوء ينتقل بسرعة 3×10^8 m/s ، لذا فنبضة الضوء تستغرق 1.43×10^8 s أو 4.5yr لكي تصل من الأرض إلى النجم (ولذا يقال أن المسافة بين الأرض والنجم هي 4.5 سنة ضوئية) . ما هو الوقت الذي تستغرقه سفينة فضاء في رحلة الذهاب والإياب حسب الساعات الأرضية إذا كانت سرعتها $0.9990c$ ؟ ولم تستغرق حسب الساعة المثبتة على سفينة الفضاء ؟ طريقة الحل : يمكننا بتقريب جيد اعتبار سرعة السفينة هي c ، وعليه تستغرق رحلة الذهاب والإياب 9 سنوات حسب الساعات الأرضية .

أما ساعات سفينة الفضاء فستدور أبطأ بكثير بمعامل نسبي مقداره

$$\sqrt{1 - (0.999)^2} \approx 0.045$$

ولهذا ستسجل ساعة السفينة السنوات التسع على أنها (9.0) (0.045) أو حوالى 0.4 yr ، أى أن الرحلة لن تستغرق سوى خمسة أشهر تقريبا فى نظر طاقم السفينة . وهى مدة محتملة جدا إذا قيست بالسنوات التسع التى يسجلها الناس على الأرض .

وقد يتصادف أن أحد توائم شخص من الطاقم قد ترك على الأرض وبذا صار عمره تسع سنين أثناء زمن الرحلة ، أما توأمه الذى كان على سفينة الفضاء فإن عمره سيكون خمسة أشهر فقط . وهذه الظاهرة المسماة بالتناقض الظاهرى للتوائم قد نوقشت طويلا بين العلماء وقد أجمعوا على أن هذه النتيجة صحيحة وأن التوأمين سيكون لهما عمران مختلفان .

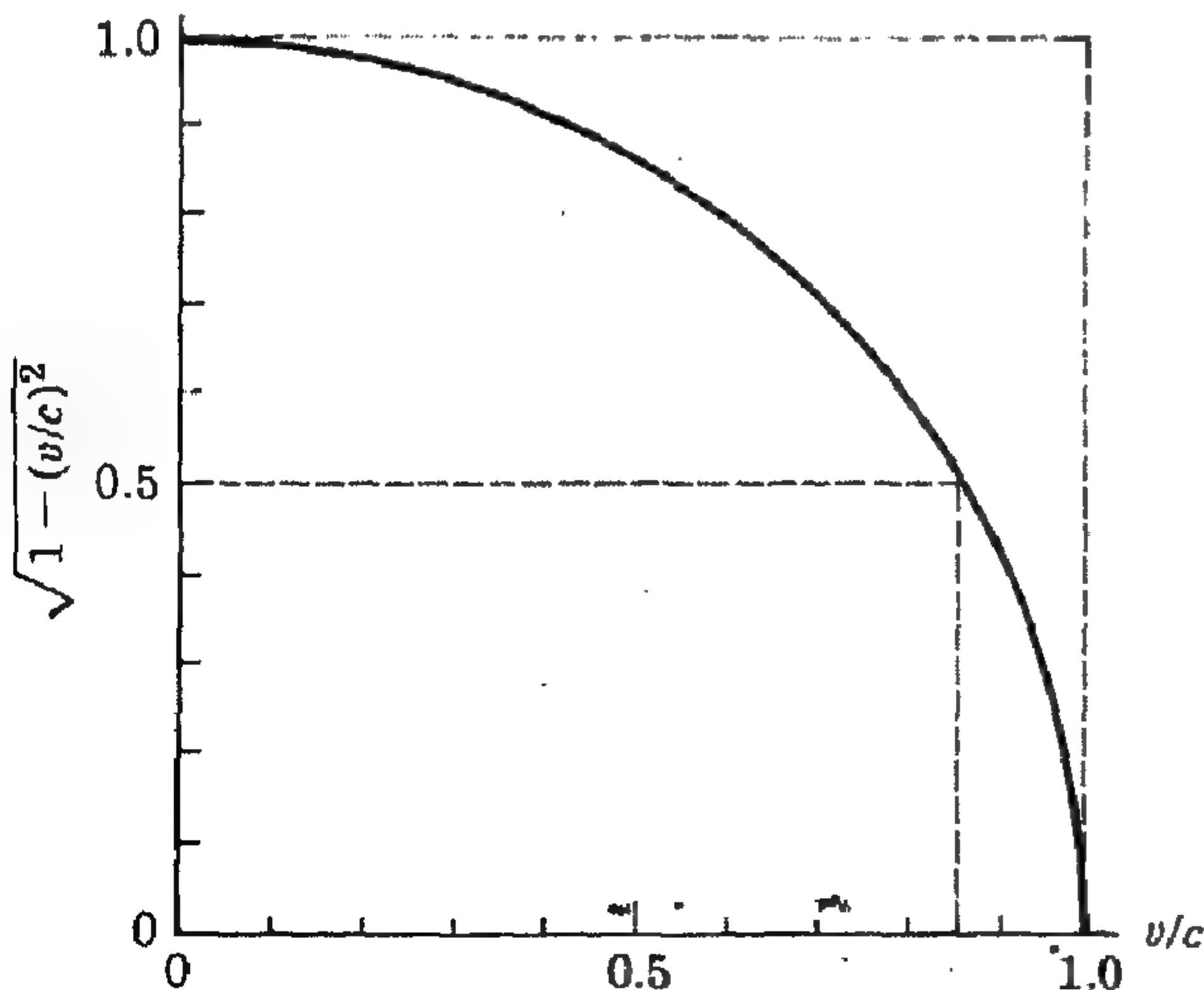
التناقض الظاهرى للتوائم

مثال توضيحي ٢٦ - ٤ ارسم العلاقة البيانية بين المعامل النسبى $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ كدالة فى v . وشرح لماذا لا نلاحظ عادة التمدد النسبى للزمن .

طريقة الحل الرسم البيانى المطلوب موضح فى الشكل ٢٦ - ١٠ . يلاحظ أن المعامل النسبى يقل عن الواحد الصحيح عند السرعات الفائقة فقط بينما السرعات العادية وهى مادون $0.10c$ فإن التغيرات النسبية لا تكون محسوسة نظرا لصغر السرعات . وفى الحياة اليومية لا تقرب ساعاتنا مطلقا من السرعات الهائلة هذه .

٢٦ - ٨ الانكماش النسبى للطول

لاشك أن ظاهرة تمدد الزمن تؤدي إلى تأثير غريب على الأطوال المقاسة ولمعرفة هذا التأثير لنعتبر مرة أخرى الرجل والمرأة فى القسم السابق . لنقل أن المرأة ظلت على



شكل (٢٦ - ١٠)
يختلف المعامل النسبى كثيرا
عن الواحد الصحيح فقط
عند السرعات التى تقترب
من سرعة الضوء .

الأرض بينما انطلق الرجل في خط مستقيم متجها إلى النجم ألفا قنطورس بسرعة v . ونخبزنا الفلكيون المستقرون على الأرض أن النجم يبعد عن الأرض مسافة قدرها $d = 4.3 \times 10^{16} \text{ m}$ ولذا فالمرأة تعلم أن الزمن الذي يستغرقه الرجل لينتقل من الأرض إلى النجم هو d/v (حسب تقدير ساعتها هي) .

ولكن كم ستستغرق هذه الرحلة حسب ساعة الرجل ؟ تعلم المرأة أن ساعته سوف تسجل زمنا $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ من قيمة ما تسجله ساعتها . ولذا يكون الزمن الذي يسجله الرجل لرحلته هو $(d/v) \sqrt{1 - (v/c)^2}$ بدلا من d/v وهذا ما سنعود إليه الآن .

علينا قبل هذا أن نشير إلى أن كلا من الرجل والمرأة متفقان على سرعتيهما النسبية . وهذا صحيح بالطبع حسب الفرض الثاني لأينشتين . أى أنهما متفقان على أن السرعة النسبية للحركة هي v . فالمرأة تقول بأن الرجل يتحرك بالنسبة للأرض وللنجم وكلاهما ساكن في مناط الإسناد الخاص بها . أما مناط الإسناد الخاص بالرجل فهو ساكن عند موقع الرجل ، وهو نظام الأرض - النجم الذي يتحرك بالنسبة إليه بسرعة v ، ولنحاول الآن الربط بين هذه الحقيقة والنتيجة السابقة .

يعلم الرجل أنه يتحرك بالنسبة لنظام الأرض - النجم بسرعة v ، وكما رأينا ، تخبره ساعته أن وقتا قدره $(d/v) \sqrt{1 - (v/c)^2}$ يلزم لكي تمر به المسافة من الأرض إلى النجم . ومن هذه الحقائق يمكنه حساب المسافة من الأرض إلى النجم وهي ، المسافة من الأرض إلى النجم بالنسبة للرجل = (الزمن) (السرعة)

$$d \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = (v) \left[\frac{d}{v} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \right] =$$

هذه هي المسافة بين الأرض والفاقنطورس كما حسبها الرجل ، أى أن الرجل يقطع مسافة أقصر من التي حسبها المرأة ، وتقل هذه المسافة بالمعامل النسبي $\sqrt{1 - (v/c)^2}$

وقد وجد أينشتين أن هذه النتيجة عامة ويمكننا تلخيصها فيما يلي :

الأجسام المتحركة بسرعة ، أمام مشاهد ما سيقيسها المشاهد فيجد أنها

انكمشت على طول خط الحركة وهي تنكمش بالمعامل $\sqrt{1 - (v/c)^2}$

لاحظ أن الانكماش حدث على طول خط الحركة فقط وأن مثل هذا الانكماش لم يلاحظ في اتجاه عمودي على الحركة .

مثال توضيحي ٢٦ - ٥ يسافر رجل في سفينة فضاء بسرعة كبيرة وهو ممسك في يده بعضا مترية . ما التغير الذي يلاحظ على طول العصا حين يغير وضعها من موازية لخط الحركة إلى وضع تكون فيه عمودية عليه ؟

طريقة الحل . لن يلاحظ أى تغير على طول العصا ، فأثر انكماش الطول يظهر في الأجسام التى تتحرك بسرعة فائقة بالنسبة للمشاهد بينما ظلت العصا ساكنة بالنسبة للرجل .

٢٦ - ٩ العلاقة النسبية بين الكتلة والطاقة

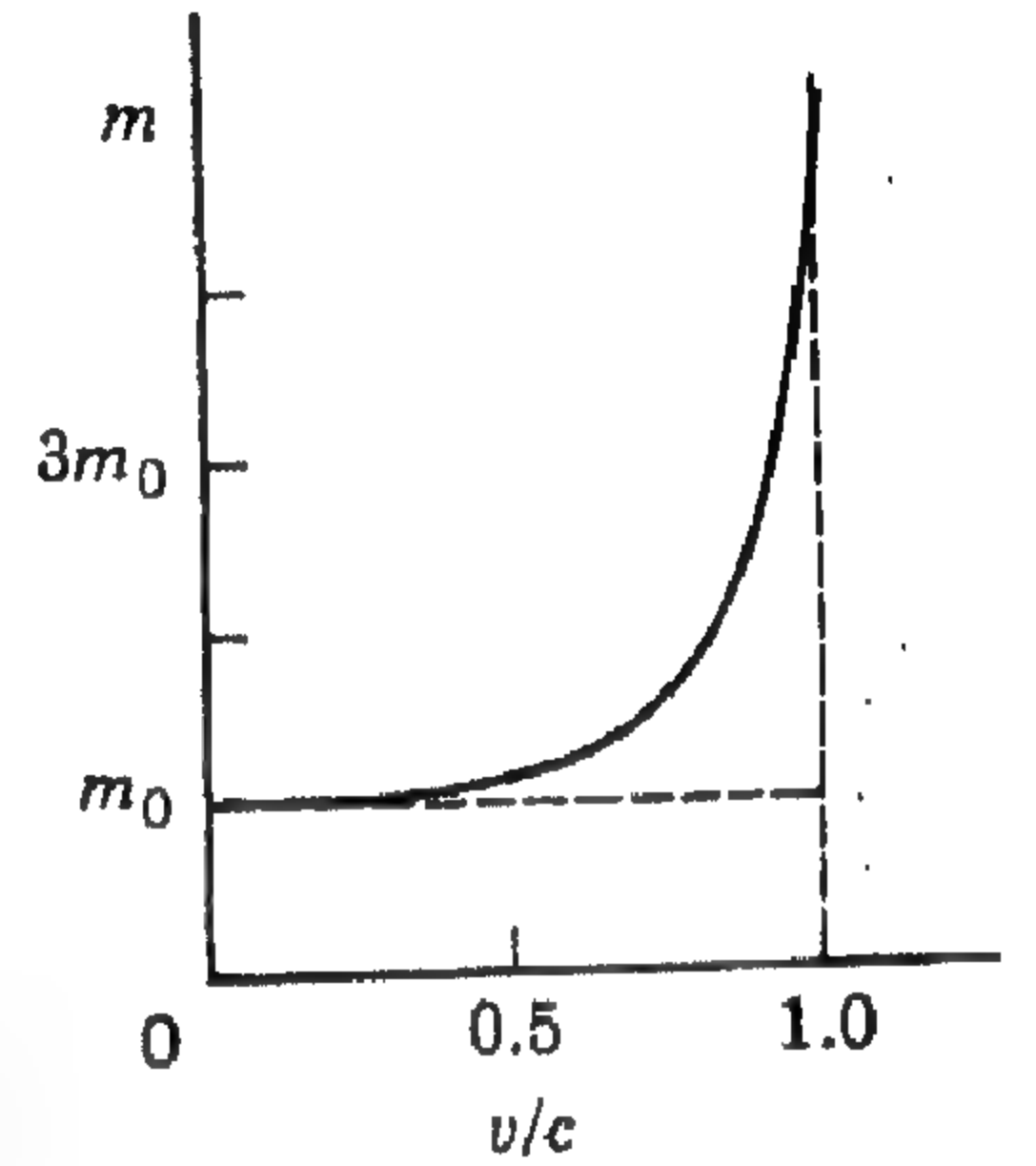
لقد دلتنا فروض النسبية على أنه لا يوجد جسم يمكن تعجيله لسرعات تزيد على سرعة الضوء . ويمكننا على الفور أن نلاحظ تناقض هذا مع أفكار ما قبل النسبية . اعتبر ، مثلاً ، جسماً كتلته m عجل بواسطة قوة ثابتة F فتكون العجلة $a = F/m$ ونتيجة لهذا تكون سرعة الجسم النهائية بعد زمن قدره t هى ببساطة .

$$v = v_0 + at = v_0 + \frac{F}{m}t$$

وهذه العلاقة يجب أن تكون خاطئة ، لأنها تتنبأ بأن السرعة يمكن أن تزيد بلا حدود وطالما كانت القوة مؤثرة فإن السرعة ستأخذ في الزيادة . وهذا يتناقض مع حقيقة أن سرعة الجسم لا يمكن أن تزيد عن c . إذن فلا بد أن يكون هناك شيء ما ، خاطئ بشكل واضح في أفكارنا اللانسبية للأجسام المتحركة بسرعات كبيرة جداً .

إن دراسة فروض النسبية تؤدي إلى معرفة مصدر هذه الصعوبة . إذ أن كتلة الجسم تتغير بتغير سرعته . فعند السكون تكون كتلة الجسم m_0 وهى كتلة السكون . أما عند السرعات العالية فتكون كتلة الجسم أكبر . تكون الكتلة الظاهرية لجسم كتلة سكونه m_0 هى $m_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$ حينما يتحرك بسرعة v أمام المشاهد .

وقد وضحت هذه العلاقة لتغير الكتلة مع السرعة في الشكل ٢٦ - ١١ .



شكل (٢٦ - ١١)
تؤول m إلى ∞ عندما تؤول v/c إلى 1
الكتلة النسبية

لاحظ هنا أهمية معامل النسبية المألوف $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ يكون تغير الكتلة مع السرعة ضئيلاً حتى تقترب السرعات من c وعندها تبدأ m في الزيادة السريعة . أما عند $v = c$ فيصبح معامل النسبية صفراً و $m/m_0 \rightarrow \infty$ تصبح كتلة جسم ما لانهاية عند اقتراب سرعة الجسم من سرعة الضوء . والكتلة اللانهاية تلزمها قوة لا نهائية حتى تعجلها . ولما كانت القوى اللانهاية مستحيلة فمن الواضح أن الجسم لا يمكن تعجيله إلى سرعة الضوء . ونحن نعلم هذا بطبيعة الحال وإن كنا نرى الآن سبباً لتقييد السرعة .

تقوم القوة المؤثرة على الجسم لتعجيله بإمداد الجسم بالطاقة . ونحن نعلم أنه عند السرعات المنخفضة يكون الشغل المبذول بالقوة المؤثرة مساوياً للزيادة في طاقة حركة

الجسم بشرط إهمال التغيرات في طاقة الوضع والشغل نتيجة الاحتكاك ، وهذا صحيح حتى لسرعات قريبة من c على أن طاقة حركة (ط ح) الجسم لم تعد هي $\frac{1}{2}m_0v^2$ وليست أيضا كما قد يظن $\frac{1}{2}mv^2$. لقد وجد بدلا من هذا أنها تعطى بالمعادلة .

$$KE = (m - m_0)c^2 \quad (٢٦ - ٤) \quad \text{طاقة الحركة النسبية}$$

يتضح أن المعادلة (٢٦ - ٤) تختصر إلى ط.ح = $\frac{1}{2}m_0v^2$ عندما $c \gg v$. ولذا فإن التعبير الصحيح لطاقة الحركة ط.ح. هو المعطى بالمعادلة ٢٦ - ٤ ، أما المعادلة $\frac{1}{2}m_0v^2 = \text{ط.ح}$ فيكون دقيقا جدا للسرعات المنخفضة بحيث يكون مؤكدا أن $m \approx m_0$ أما حين تكون $c \rightarrow v$ فإن المقدار $(m - m_0)c^2$ هو الذى يعبر عن ط.ح.

من الممكن إثبات أن علاقة شبيهة بالمعادلة (٢٦ - ٤) تنطبق على كل صور الطاقة ، وقد بين أينشتين أنه عند أى تغير في طاقة جسم ما ، يكون هناك تغير مناظر في كتلته . وتكون النتيجة هي أنه لتغير مقداره ΔE في الطاقة ، تتغير كتلة الجسم بمقدار Δm يعطى بالمعادلة ،

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad (٢٦ - ٥) \quad \text{العلاقة النسبية بين الكتلة والطاقة}$$

(وهذه كثيرا ما تكتب $E = mc^2$) . فإذا زدنا من ط.ح الجسم ما ، مثلا ، فإن كتلته تزيد تبعاً لذلك حسب المعادلة ٢٦ - ٥ . وفى الواقع فإن هذه المعادلة تنبأ بأن الكتلة لا يمكن أن تخلق عند تزويد الجسم بالطاقة (كما سنرى أمثلة على هذا فيما بعد) . أو بشكل أكثر بريقا أن الكتلة يمكن تدميرها لخلق الطاقة . وفى كلتا الحالتين يكون التغير Δm فى الكتلة مناظرا لتغير قيمته $\Delta m c^2$ فى الطاقة . وربما تكون على علم فعلا بأن الطاقة النووية لمفاعل ما أو لقنبلة نووية تنتج من حقيقة أن قدرا من الكتلة Δm قد دمر لإنتاج طاقة مقدارها $\Delta m c^2$.

مثال توضيحي ٢٦ - ٦ تبلغ قيمة الطاقة الكيميائية المتاحة فى تفاحة وزنها 100 g حوالى 100 k cal (لا يذكر علماء التغذية لفظ kilo ويسمونه cal مباشرة) . ولقد علمنا من دراسة الحرارة أن السعر calorie هو 4.184 J من الطاقة أى أن التفاحة تحتوى على 420J من الطاقة المتاحة . قارن هذه الكمية مع الطاقة التى يمكن الحصول عليها لو تحولت كل الكتلة إلى طاقة .

طريقة الحل . حسب معادلة الكتلة والطاقة فإن

$$\Delta m c^2 = \text{الطاقة}$$

وفي هذه الحالة $\Delta m = 0.10 \text{ kg}$ و $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ، ولذا ،

$$\text{الطاقة} = 9 \times 10^{15} \text{ J}$$

من هنا نرى أنه عندما نأكل تفاحة فإننا نحصل على كسر ضئيل فقط من طاقتها (10^{-13}) .

مثال توضيحي ٢٦ - ٧ ينشأ الضوء المشاهد على شاشة التلفزيون من الالكترونات التي تنطلق داخل الأنبوبة ثم تصدم الساتر الفلورى عند نهايتها ، وتصل سرعة هذه الالكترونات إلى ما يقرب من ثلث سرعة الضوء . ما هي الكتلة الظاهرية للالكترون له مثل هذه السرعة؟ $(m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})$
طريقة الحل تتحرك الالكترونات بسرعة تساوى $v = c/3$ بالنسبة لشخص يشاهد جهاز التلفزيون . ونتيجة لهذا ،

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{0.89}} = 1.06m_0$$

ومنها

$$m = 9.6 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

أى أنه حتى عند هذه السرعة الهائلة لم تزد كتلة الالكترون إلا بمقدار 6 فى المائة .

٢٦ - ١٠ كمية تحرك الفوتون

لنعد الآن إلى مناقشة كم الضوء أو الفوتون . بما أن للفوتون طاقة فمن المتوقع أن تكون له كمية تحرك وكذلك كتلة . على أننا يمكن أن ندرك أن كتلة السكون للفوتون يجب أن تكون صفراً .

وحيث أنه ينتقل بسرعة مقدارها c فى الفراغ ، فإن

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 1}} = \frac{m_0}{0}$$

لو أن m_0 كانت لها أية قيمة إلا الصفر لأصبحت كتلة الفوتون لانهاية ، وحيث أن $E = mc^2$ ، فإن الكتلة اللانهائية ستعنى طاقة لا نهائية للفوتون ونحن نعلم أن هذا غير حقيقى . من هنا يجب أن نستنتج أن كتلة السكون للفوتون صفر .
لإيجاد كمية تحرك الفوتون سنفيد من علاقته الطاقة للفوتون ،

$$\text{طاقة الفوتون} = mc^2 = (m - m_0)c^2 \quad \text{و} \quad \text{طاقة الفوتون} = h\nu$$

لو ساوينا هاتين المعادلتين لأمكننا أن نحل لإيجاد كمية تحرك الفوتون mc التي سنرمز لها بالرمز p وهي ،

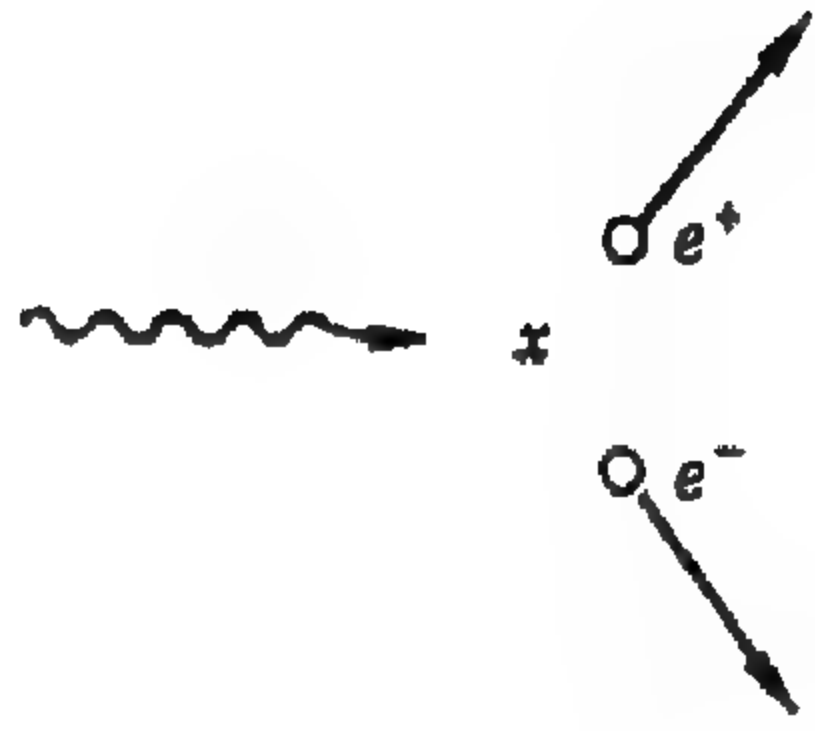
كمية تحرك الفوتون

٢٦ - ٦

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

وقد استخدمت هذه القيمة بواسطة كومبتون وديبای في نظريتهما عن ظاهرة كومبتون ،

وهذا يكون لدينا طريقة لتخصيص طاقة وكمية تحرك لفوتونات الأمواج الكهرمغناطيسية وعلى الرغم من أن هذه الأمواج تبدو على أن لها طبيعة جسيمية في ظروف معينة إلا أن الفوتونات تدين بكتلتها لطاقة حركتها . إذ لا كتلة سكون لها . وأية محاولة لإبطاء الفوتونات إما أن تكون غير ناجحة أو تجعلها تتخلص من طاقتها إلى صورة أخرى .



وهناك مثال صارخ على ما يحدث للفوتون حين يتفاعل بحيث يفقد هويته وذلك في ظاهرة الإنتاج الزوجي . يلاحظ أحيانا في تجارب سيأتى وصفها في الفصل الثامن والعشرين أن الفوتونات عالية الطاقة تختفى مع خلق الكترين كما يصور ذلك الشكل ٢٦ - ١٢ .

شكل (٢٦ - ١٢)
يتحول الفوتون إلى بوزيترون
والكترون عندما يصل إلى
النقطة x ويسمى هذا إنتاج
زوجي .

لقد وجد أن الفوتون الذي ينتقل خلال المادة ينحل عند النقطة x إلى الكترين سالب وبوزيترون (الكترين موجب) مع ملاحظة أنه لا تخلق أية شحنة في هذه العملية بمعنى أن الشحنة الكلية محفوظة . ومن الطبيعي أن تكون الطاقة وكمية التحرك محفوظتين ويمكن تحقيق هذا الشرط اذا حدث التحلل 'قرب من نواة فقط . وعلى الرغم من أن الشحنة ، كمية التحرك ، والطاقة كلها محفوظة في الإنتاج الزوجي ، إلا أن هناك كتلة سكون تخلق فعلا في هذه العملية ، وذلك لأن الفوتون الأصلي كانت كتلة سكونه صفرا بينما للنواتج النهائية كتلة سكون تساوى ضعف كتلة الالكترين .

٢٦ - ١١ موجات الجسيمات

تتصرف الأمواج الكهرمغناطيسية تحت ظروف معينة كما لو كانت مكونة من جسيمات كما رأينا . وقد تبدو ثنائية الجسيم - الموجة غريبة نوعا ما ، ومع هذا لم تؤثر حالة معروفة ، بحيث يظهر تناقض معها . ففي أية تجربة يستطيع الإنسان دائما أن يقرر نوع السلوك الموجود . ويمكن تلخيص السلوك العام بعبارة هي أن السلوك الموجي يسود أثناء انتشار الإشعاع أما السلوك الجسيمي فيسود خلال التفاعل مع المادة .

وهناك تشابه إلى حد ما في مواقف تحدث بين البشر . فبغض النظر عن حسن معرفتنا بشخص ما إلا أننا لا نستطيع بداهة أن نقرر كيف ستكون أفعاله حين يواجه موقفا جديدا . وحين نندهش من تصرفه فإننا نبرر دهشتنا بالقول بأننا لم نعرفه جيدا كما كنا نظن . وبالمثل بالنسبة للأمواج الضوء : ففي عام ١٩٠٠ اعتقدنا أننا نعرفها جيدا ثم دهشنا حين وجدناها تتصرف بصورة غير متوقعة في مواقف جديدة كما في ظاهرة كومبتون والتجارب الكهروضوئية .

بمجرد اكتشاف الطبيعة الجسيمية للأمواج الضوء برز سؤال عما إذا كانت الجسيمات قد تسلك أحيانا سلوك الموجات . وقد عولج هذا السؤال أولا على يد لوى دى بروى عام ١٩٢٣ (كان عمره وقتها ٣١ عاما ويشكل هذا العمل رسالته للدكتوراه) . وقد فكر في أنه لما كانت كمية تحرك الفوتون تساوى h/λ فقد يكون ممكنا أن تكون كمية تحرك جسيم مادي ، الكترون مثلا ، مساوية لكمية كهذه . وفي هذه الحالة تكون λ هي الطول الموجي للالكترون . أو على الأقل خاصية موجية مرتبطة بالالكترون وبناء عليه كتب $mv = h/\lambda$ ومنها

$$\text{طول دى بروى الموجى} \quad \frac{h}{mv} = \text{الطول الموجى المرتبط بالجسيم} \quad (٢٦ - ٧)$$

وهذا ما يسمى بطول دى بروى الموجى لجسيم ما

سنرى في الفصل القادم أنه كانت لديه طريقة متاحة لاختبار صحة هذا الفرض . لقد افترض نيلز بوهر ، على وجه الخصوص ، نموذجا لذرة الايدروجين مفترضا فيه أن الالكترون يتصرف بطريقة محددة جدا . وقد ثبت أن هذا النموذج ناجح إلى أبعد حد في تفسير خواص الذرات إلا أن بوهر لم يكن قادرا على تقديم أى تفسير لسلوك الالكترون بالطريقة التى افترض أنه يقوم بها . أما دى بروى فقد بين أنه لو كان للالكترون خواص موجية وطول موجى معطى بالمعادلة (٢٦ - ٧) فإن فرض بوهر يتضح فورا كنتيجة لهذه الخاصية الموجية . وسنعود إلى هذه المسألة مرة أخرى بعد أن نناقش ذرة بوهر في الفصل القادم .

لقد حصل دافيسون وجيرمر عام ١٩٢٧ على برهان مباشر للطبيعة الموجية للجسيمات المادية ، أثناء دراسة استطارة الالكترونات من البلورات المعدنية . فقد أطلقا شعاعا من الالكترونات نحو بلورة معدنية (النيكل) ولاحظا عدد الالكترونات المستطارة عند زوايا مختلفة بعد اصطدام الشعاع بالمعدن . وقد وجدوا أنه تحت ظروف معينة يستطار الشعاع الالكتروني بصورة انتقائية بحتة فتخرج الالكترونات كثيرة عند زوايا معينة وتخرج كمية ضئيلة عند زوايا أخرى ولم يكن لديهما أى تفسير لهذه النتائج في بادئ الأمر وقرروا أنها غير قابلة للتفسير .

حينما اقترح على دافيسون وجرمر أن هذه النتائج قد تكون عبارة عن تأثيرات التداخل الموجي الناشئ من الطبيعة الموجية للإلكترونات ، كما فرضها دي برولي ، قاما بعمل المزيد من القياسات لاختبار هذه النقطة . وسرعان ما أكد كثير من الباحثين أن الإلكترونات تنعكس من البلورات بنفس الطريقة التي تنعكس بها أشعة X . وقد رأينا في الفصل الخامس والعشرين كيف يمكن حساب الزوايا التي تنعكس عندها أشعة X بشدة من على بلورة إذا علم الطول الموجي لأشعة X وكذا البعد البيني في النسق البلوري . وباستخدام معادلة دي برولي للطول الموجي المصاحب للإلكترون يمكن التنبؤ بزوايا الانعكاس القوي للإلكترونات وقد كان الاتفاق ممتازا مع النتائج العملية . ومن ثم يصبح لدينا برهان مباشر معقول على حقيقة أن الإلكترونات تتصرف أحيانا كموجات وأن طبيعتها الموجية يمكن التنبؤ بها من المعادلة (٢٦ - ٧) .

مثال توضيحي ٢٦ - ٨ عجل الكترون خلال فرق للجهد مقداره 182 V . كم يبلغ الطول الموجي المصاحب له ؟
طريقة الحل . توجد أولا سرعة الإلكترون من المعادلة المألوفة .

$$Vq = \frac{1}{2}mv^2$$

(من المسموح به هنا استعمال طرق لا نسبية حيث أن v أقل بكثير من c) .
بالتعويض فإننا نجد $v = 8 \times 10^6 \text{ m/s}$ أما الطول الموجي المصاحب فهو ،

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(8 \times 10^6 \text{ m/s})}$$

$$= 0.91 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.91 \text{ \AA}$$

وهو يقارب مقدار الأطوال الموجية لأشعة X . ومن هنا يتضح سبب ظهور تأثيرات حيودية للإلكترونات مثل أشعة X .

مثال توضيحي ٢٦ - ٩ تتدحرج كرة بيسبول وزنها 50 g على منضدة بسرعة 20 m/s كم يبلغ الطول الموجي المصاحب لها ؟

طريقة الحل بتطبيق المعادلة (٢٦ - ٧) واستخدام وحدات SI نجد أن $\lambda = 6.6 \times 10^{-32} \text{ m}$ ولكي نجري تجربة تداخل بهذه الكرة ، كان علينا أن نجعلها تمر من شقوق تفصل بينها مسافة كهذه . وحيث أن هذه المسافة أصغر بكثير جدا من الأبعاد الذرية فمن الواضح استحالة إجراء تجربة تداخل كهذه بالكرة .

وأية حسابات مشابهة لأي جسم له حجم مما يستعمل عادة في المعامل ستكون مقنعة بأن الأطوال الموجية المصاحبة للجسم أقل بكثير جدا بحيث لا تسمح

باكتشاف الطبيعة الموجية للجسم . ولا تظهر هذه التأثيرات وتصبح ملموسة إلا حين تصغر الكتلة m جدا - كما للالكترونات والذرات - وتصير الأطوال الموجية أكبر بشكل معقول .

٢٦ - ١٢ مبدأ عدم اليقين

لقد أجريت التجارب العديدة منذ اكتشاف الطبيعة الموجية للالكترون بهدف معرفة ما إذا كانت جسيمات أخرى لها نفس السلوك . من المستحيل كما رأينا في المثال التوضيحي ٢٦ - ٩ أن نبتكر تجربة نرصد فيها الطبيعة الموجية للأجسام الكبيرة . إن الجسيمات ذات الحجم الذرى يمكن بسهولة نسبية دراسة التأثيرات الموجية لها . ولم يؤثر أى استثناء لمعادلة الطول الموجى لدى برولى ، بل إنه أصبح من الشائع استعمال الالكترونات والنيوترونات فى تجارب للحيود صممت خصيصا لدراسة التركيب البلورى .

وتؤدى الطبيعة الموجية لجميع الجسيمات إلى مبدأ فلسفى عظيم . فقبل هذا الاكتشاف كثيرا ما تجادل الفلاسفة عما اذا كان مصير الكون محددًا تماما . فهل نستطيع - من حيث المبدأ على الأقل - أن نحدد موضع وسرعة وطاقة كل الجسيمات فى الكون ثم نتنبأ بعد ذلك بمسار الأحداث فى المستقبل ؟ يبدو أن الطبيعة الموجية لكل الجسيمات ستتطلب منا أن نحجب بالنفى على هذا السؤال . وقد انطوى مبدأ عدم اليقين لهيزنبرج على هذه الحقيقة . ولذا سنقوم الآن بفحصه .

لننظر الآن كيف يمكننا تعيين موضع وسرعة و ط. ح لجسم أو جسيم . لتعيين موضع الجسم علينا إما أن نلمسه بجسيم آخر أو ننظر إليه فى ضوء شعاع ما . وليكن الشعاع للضوء من الضعف بحيث لا تقوم كمية تحركه بإحداث أية اضطرابات للجسم الذى ننظر إليه ، أو ربما نختار أن نلمس الجسم بجسيم منفرد وصغير لأقصى حد . سنطلق على الفوتون أو الجسم الذى يستخدم لدراسة الجسم اسم الجسم المجس .

ولكى نجعل الاضطراب الذى يحدثه الجسم المجس أقل ما يمكن سنستعمل أقل ما يمكن من الطاقة . على أن هناك حد أدنى للطاقة لأن الطول الموجى للجسم المجس يجب أن يكون أصغر من الجسم المفحوص ، وإلا حدثت تأثيرات تداخل وحيود كما رأينا فى الفصل الخامس والعشرين ، وجعلت الموجات المصاحبة للجسم المجس تكون صورا غاية فى التشويش للجسم . وقد رأينا - على وجه الخصوص - فى الفصل الخامس والعشرين أن أدق التفاصيل التى نراها باستخدام الموجات (موجات الجسم

أو الضوء) يجب أن تكون في حجم الطول الموجي . ومن ثم ، فإن موضع الجسم الذي ننظر إليه قد يتحدد بصورة بها بعض الخطأ مقداره ،

$$\Delta x \approx \lambda$$

وعلاوة على ذلك فإن كمية تحرك الجسم المجسى (سواء أكان فوتونا أو مادة) تعطى بالمعادلة $p = h/\lambda$. وعندما يلمس الجسم المفحوص فإن بعض كمية التحرك هذه سوف يؤول إلى الجسم مما يجعل كمية تحرك هذا الجسم تضطرب بسبب هذا التغير . ويكون هناك قدر من عدم اليقين في كمية تحرك الجسم مقداره Δp ويعطى بالمعادلة ،

$$\Delta p \approx \frac{h}{\lambda}$$

فإذا ما ضربنا المعادلتين الخاصتين بـ Δx و Δp معا سنجد أن

$$\Delta p \times \Delta x \approx h$$

أو بطريقة أخرى ، عندما نستعمل أكثر التجارب التي يمكن تخيلها دقة لتعيين موضع جسم وقياس كمية تحركه في نفس الوقت فإن حاصل ضرب الخطأ في هذين القياسين سيكون مقاربا في القيمة لثابت بلانك h . وهذه العلاقة تعتبر علاقة عامة تماما وهي صورة من صور مبدأ عدم اليقين لها يبرز .

يمكن الحصول على صورة أخرى لمبدأ عدم اليقين من خلال تحليل مماثل . فعندما يقترب الجسم المجسى من الجسم المفحوص فإن موضع الجسم سيكون غير مؤكد في مسافة قدرها λ تقريبا كما رأينا منذ قليل . ونرى هي بالطبع الطول الموجي المصاحب للجسيم المجسى . لو أن سرعة الجسم المجسى كانت v فإن الزمن الذي يستغرقه الجسم لكي ينتقل مسافة عدم اليقين هذه يكون λ/v . ومن ثم يكون الزمن الصحيح - عندما يكون الجسم في موضع معين - غير مؤكد بمقدار ،

$$\Delta t \approx \frac{\lambda}{v}$$

بالإضافة إلى هذا ستفقد طاقة الجسم المجسى جزئيا إلى الجسم المفحوص عندما يصبح الاثنان متلامسين . ولذا يكون عدم اليقين في طاقة الجسم مقاربا في المقدار لطاقة الجسم المجسى . وعليه ،

$$\Delta E \approx \frac{hv}{\lambda}$$

بضرب المعادلتين الأخيرتين في بعضهما نجد أن

$$\Delta E \times \Delta t \approx h$$

وهذه هي الصورة البديلة لمبدأ عدم اليقين* . مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج : في قياس متزا من للإحداثي x وكمية التحرك p للجسيم ما فإن ، مبدأ عدم اليقين

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \quad (26 - 8)$$

حيث Δx و Δp هما الخطأ في قياس x و p . وبالمثل لو أن طاقة الجسيم E في زمن قدره t قد قيسا معا فإن الخطأ ΔE و Δt يكونان بحيث أن :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} \quad (26 - 9)$$

من المستحيل ، إذن ، حتى من حيث المبدأ ، أن نعلم كل شيء عن جسم ما . فسيكون هناك دائما عدم يقين حول الطاقة الحقيقية في زمن معين وحول كمية التحرك الحقيقية في مكان معين . وهذه تعتبر واحدة من النتائج الأساسية المتأصلة في مفاهيم كمات الضوء والموجات الجسيمية . من الواضح أن صياغة جديدة قد أصبحت لازمة لوصف الجسيمات الذرية وكمات الضوء في المواقف التي تكون فيها هذه التأثيرات هامة . وقد ابتكرت طرق ميكانيكا الكم والميكانيكا الموجية لكي تتناول هذه الظواهر .

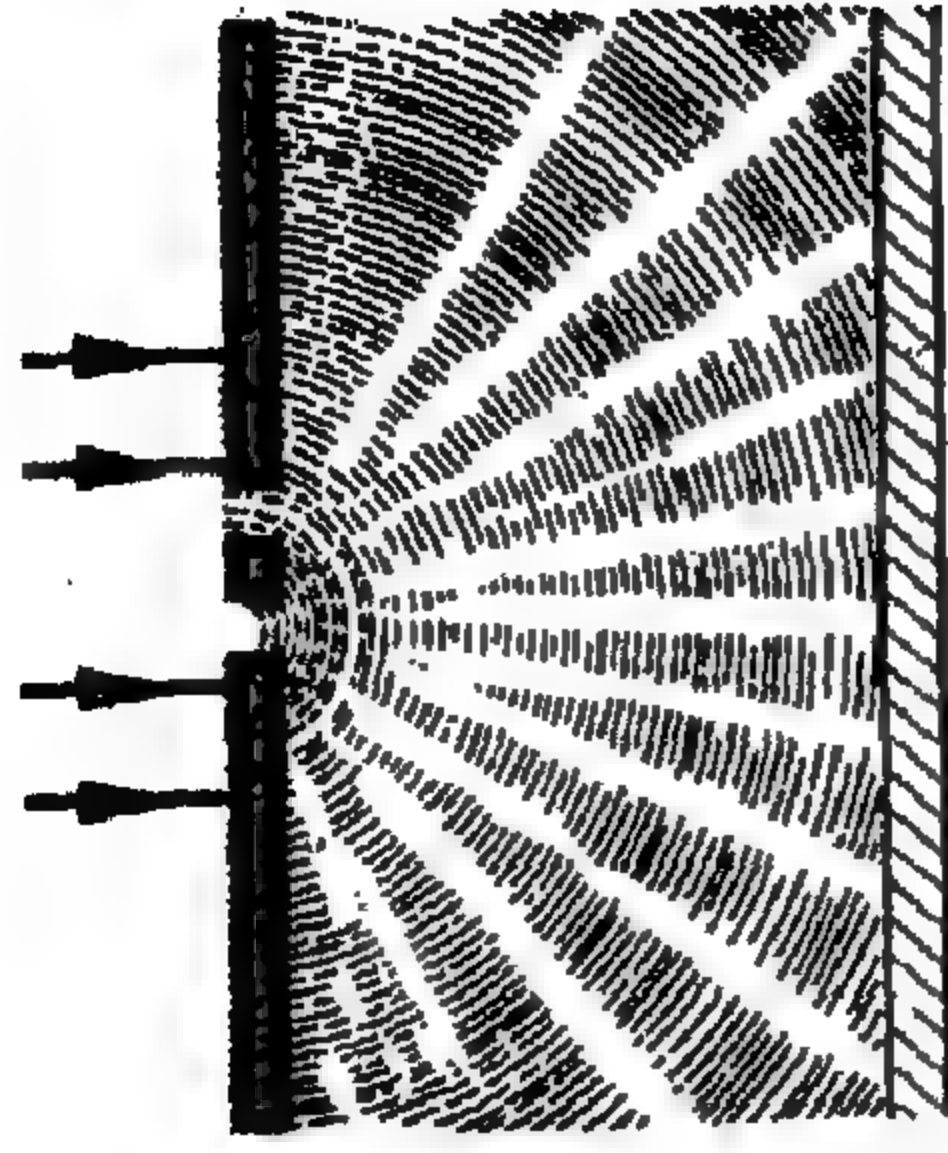
٢٦ - ١٣ ميكانيكا الكم

لنقم بفحص تجربة بسيطة حتى نرى بدقة أين تنطبق الطرق الكلاسيكية للميكانيكا وأين لا تنطبق . علينا لهذا الغرض أن نعتبر تجربة شق مزدوج معدلة كما في الشكل ٢٦ - ١٣ . يسقط شعاع ضوئي منتظم على الشقين كما هو مبين ويصطدم الضوء بعد أن ينفذ خلالهما بالساطر الموجود خلفهما . وكما علمنا في الفصل الخامس والعشرين لو أن عرض الشق وفاصل الشق d كانا أكبر بكثير من الطول الموجي للضوء فإن ظلالا واضحة ستسقط على الساطر ، وتظهر بقعتان مضيئتان هما في الواقع صورتان حادتان للشقين على الساطر كما يوضح ذلك الشكل ٢٦ - ١٣ أ

* لقد بينت حسابات أكثر دقة أن h يجب أن يستبدل بها $h/2\pi$ في كل حالة .

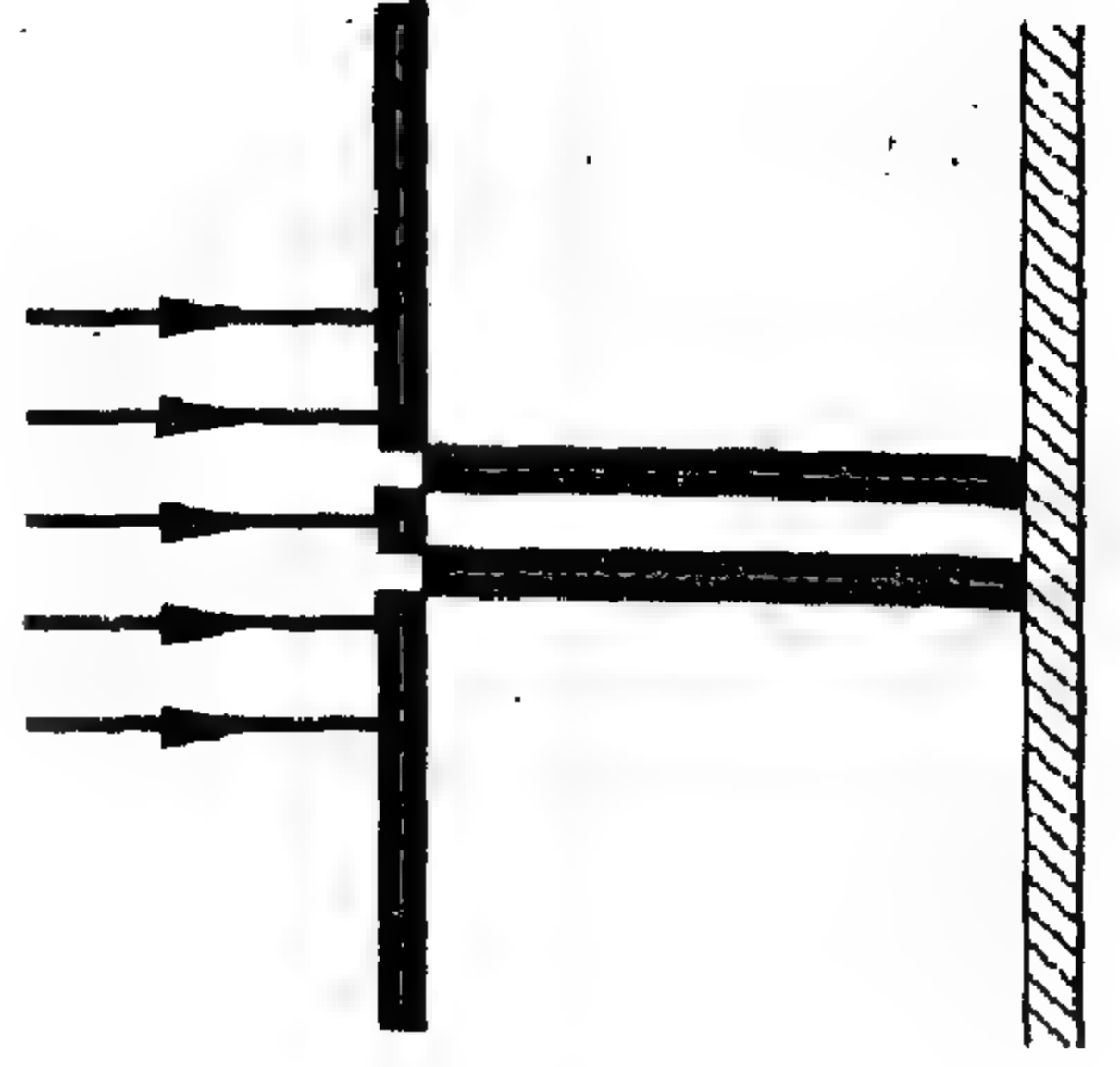
شكل (٢٦ - ١٣)

(أ) عندما يكون الطول الموجي المصاحب للجسيم أقل بكثير من عرض الشق ، تكون صور واضحة للشق .
(ب) ولكن عندما تكون λ بحيث تقارن بعرض الشق فإننا نلاحظ ظواهر التداخل الخطية .



λ تقارن بأبعاد الشق

(ب)



عرض الشق $\ll \lambda$

(أ)

وبالمثل ، إذا سقط شعاع متواز من الالكترونات على الشقين فإنه يسلك كما في الشكل ٢٦ - ١٣ بشرط أن يكون الطول الموجي المصاحب للالكترونات أقل بكثير من فاصل الشق ، وعلى ذلك فالموقف المبين في الشكل ٢٦ - ١٣ هو ما يمكن توقعه بالضبط من الميكانيكا الكلاسيكية للجسيم وفي هذه الحالة يتساوى شعاع من كرات البيسبول مع شعاع من الالكترونات وكلاهما ينفذ من الفتحات ويسقط على الساتر داخل منطقة جيدة التحديد . أى أن الميكانيكا الكلاسيكية النيوتونية تكون صحيحة عندما يكون الطول الموجي للجسيم أصغر بكثير من الأبعاد الهندسية المتضمنة في التجربة .

أما إذا اعتبرنا سلوك الشعاع الضوئي عندما يكون فاصل الشق بحيث يمكن بمقارنته بالطول الموجي للضوء ، فإننا نلاحظ نمطا عريضا للتداخل على الساتر . يوضح الشكل ٢٦ - ١٣ ب أن صور الشقين لم تعد تلاحظ . وبالمثل بالنسبة لشعاع الالكترونات : لو أن الطول الموجي المصاحب للجسيمات كان بحيث يقارن بفاصل الشق فإن الشعاع ينتشر ويسقط على الساتر مكونا نمطا للتداخل كما في الجزء (ب) من الشكل ٢٦ - ١٣ ، وشدة نمط التداخل في حالة موجات الضوء تشبه عدد الالكترونات الساقطة على الساتر في حالة الجسيمات ، أى أنه لا جسيمات تسقط حيث تكون شدة الضوء - الذى له λ مماثلة - صفرا ، وأن الحد الأقصى من الجسيمات يسقط على الساتر حيث يجب أن تكون شدة الضوء في نهايتها العظمى . وهذا الموقف مغاير تماما لما يمكن أن نتوقعه من الميكانيكا النيوتونية . ومن ثم لا تنطبق الميكانيكا الكلاسيكية في هذا الموقف . أى تصبح الميكانيكا الكلاسيكية غير صحيحة عندما يصير الطول الموجي للجسيم معادلاً للأبعاد الهندسية المتضمنة في التجربة .

صلاحية الميكانيكا الكلاسيكية

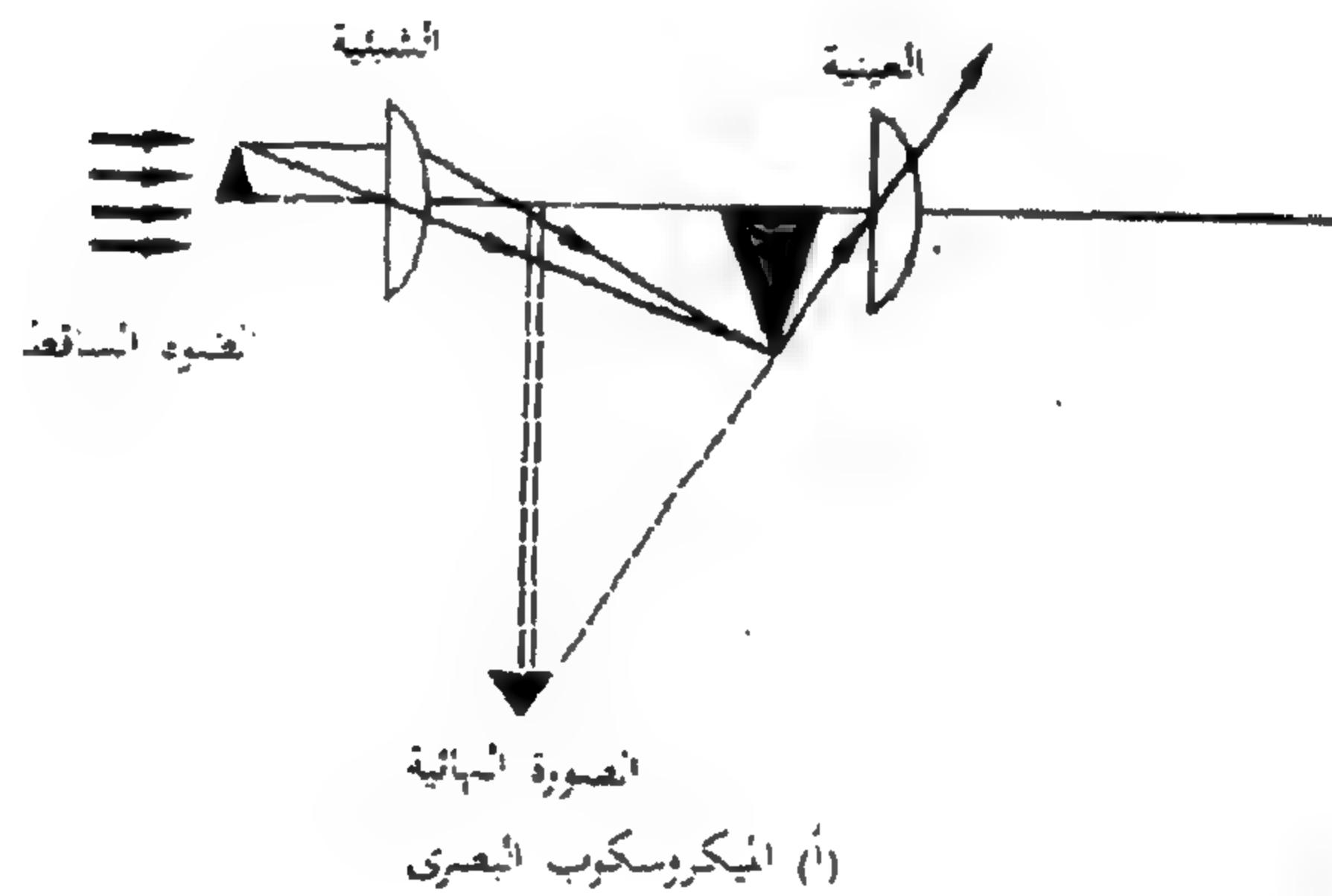
على أنه من الواضح أن سلوك الشعاع الضوئي يوصف دائما بشكل كاف بدلالة الظواهر الموجية — على الأقل في هذه التجربة — . وحيث أن سلوك الجسم يمكن وصفه بدلالة الموجات المصاحبة في كلتا الحالتين بينما يقتصر دور الميكانيكا النيوتونية على وصف الحالة المبينة في الجزء (أ) فقط ، لذا يتضح أن وجهة النظر الموجية قابلة للتطبيق بشكل أعم .

بمجرد أن اقترح دي برولي الطبيعة الموجية للجسيمات ، قام اربوين شرودينجر ، بوضع معادلة تصف سلوك الجسيمات بدلالة طبيعتها الموجية . وأصبحت معادلة شرودينجر أساس ميكانيكا الكم . وهذه المعادلة هي معادلة تفاضلية وتعتبر امتداداً لمعادلة مماثلة تستخدم لوصف سلوك الأمواج الكهرومغناطيسية . وقد أصبح من المعتقد الآن أنه بتعديل طفيف يمكن لمعادلة شرودينجر أن تتنبأ بالسلوك المشاهد للجسيمات تحت كل الظروف . وقد يكون علينا ، إذن ، أن نتخلى عن كل الميكانيكا التي تعلمناها في هذا الكتاب . وأن نبدأ من جديد من هذه المعادلة الأساسية . على أن ذلك سيكون تهوراً ، فمعادلة شرودينجر صعبة للغاية حين تستخدم في الحصول على إجابات عملية إلا في أبسط المسائل . ولهذا يحتفظ الفيزيائيون بالمفاهيم الكلاسيكية والنيوتونية ويستخدمونها لحل معظم المسائل . ولا يهتمون بالتأثيرات النسبية إلا حين تصبح سرعات الجسيمات قريبة من سرعة الضوء ، كما أنهم لا يهتمون بتأثيرات ميكانيكا الكم إلا حين تصبح الأبعاد الهندسية مقارنة بالطول الموجي للجسيم . وفي هذه الحالة ، وعلى الرغم من الصعوبات القائمة ، يجب استخدام ميكانيكا الكم للحصول على إجابات موثوق بها . وسنرى في الفصل القادم أن السلوك الداخلي للذرات هو إحدى هذه الحالات .

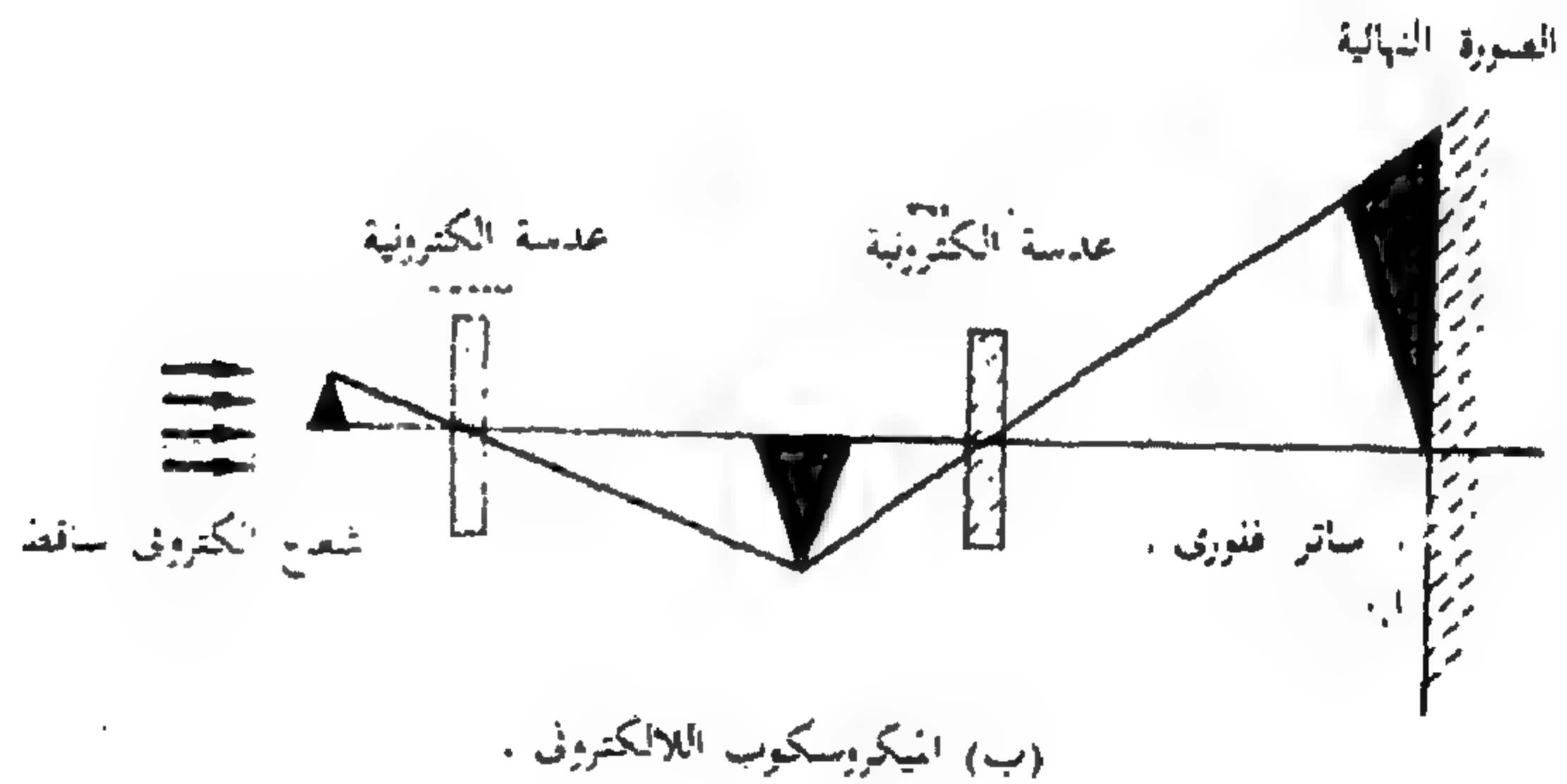
٢٦ - ١٤ الميكروسكوب الإلكتروني

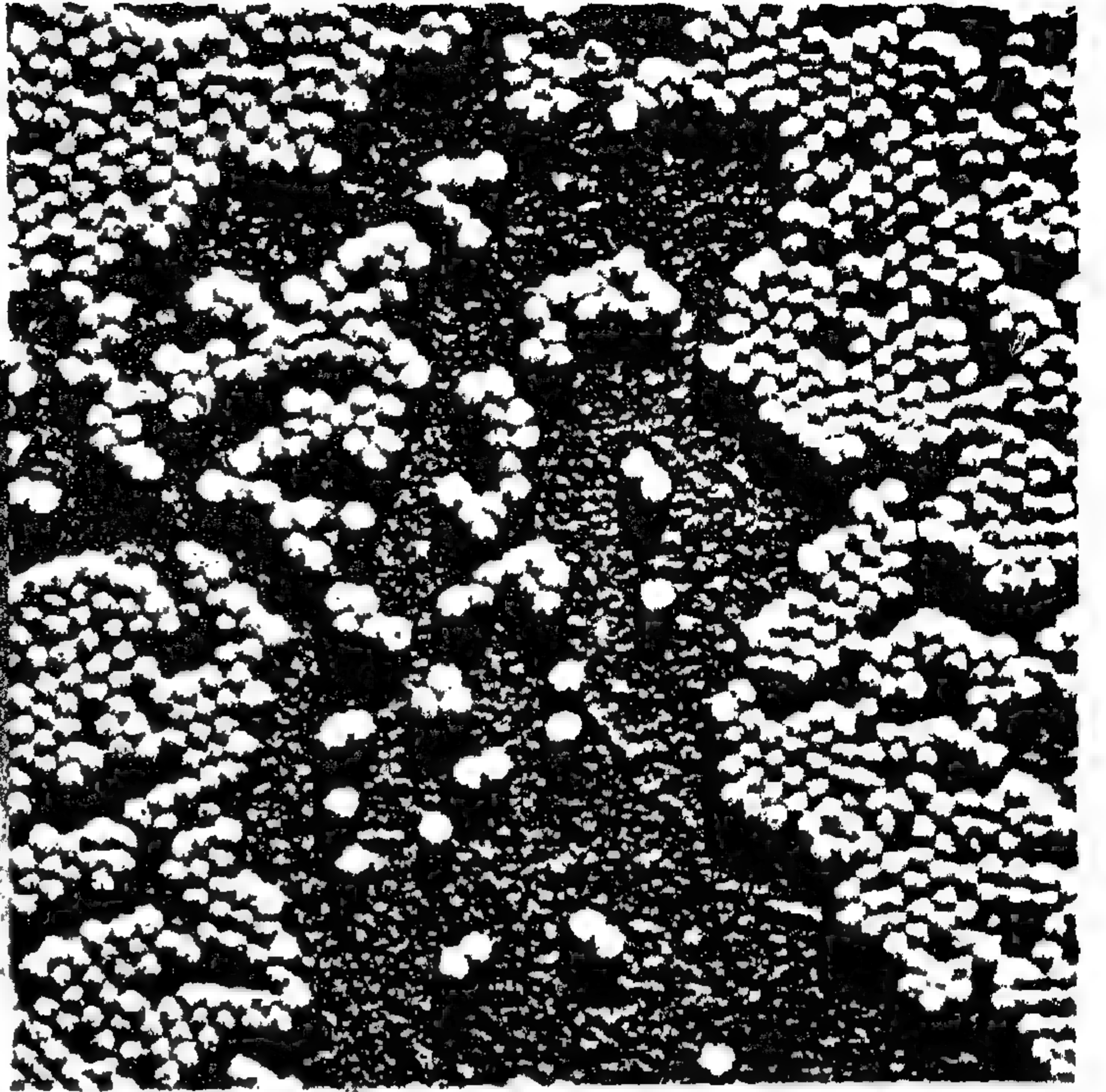
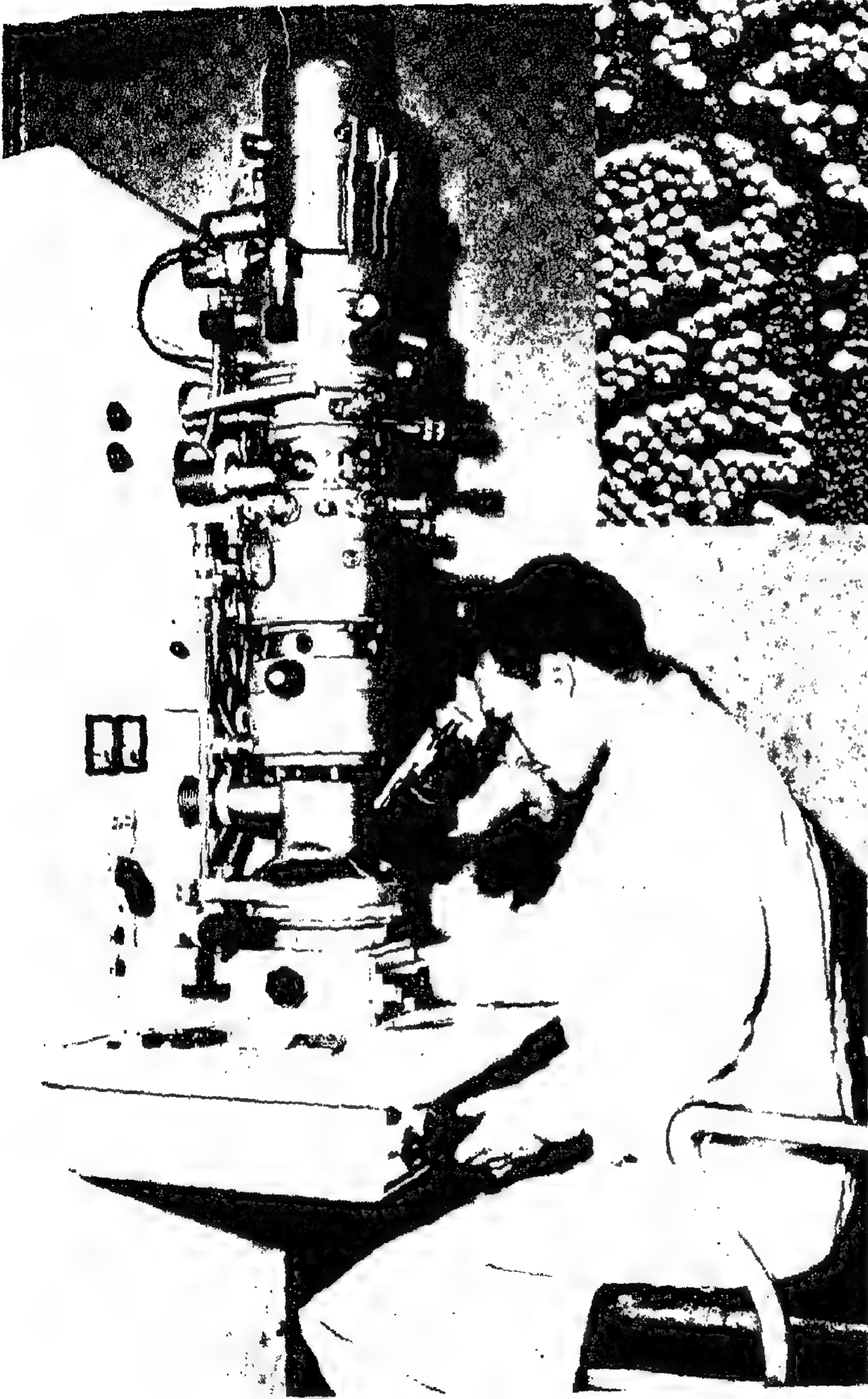
للالكترونات والجسيمات ذات الحجم الذري — كما رأينا — طبيعة موجية . فشعاع الالكترونات العادي تكون الموجات المصاحبة له ذات طول موجي يقع في مدى أشعة X القصيرة جداً كما حسبنا في المثال التوضيحي ٢٦ - ٨ . ولو أمكن استخدام شعاع من الالكترونات بدلا من الضوء في ميكروسكوب ما ، فإن هذا الميكروسكوب سيتمكن من « رؤية » جسيمات غاية الصغر في الحجم وذلك لأن الحجم الحدي يمكن مقارنته بالطول الموجي للموجات المستخدمة . وفي حين أن الميكروسكوبات العادية قادرة على رؤية تفاصيل أكبر من حوالي 100 nm ، فإن الميكروسكوب الذي يستخدم شعاعاً من الالكترونات يجب أن يكون قادراً على رؤية تفاصيل تبلغ من الصغر ما قيمته عدة عشرات من nm .

يكاد المبدأ الأساسي للميكروسكوب الالكتروني يتطابق مع ذلك الذي للميكروسكوب الضوئي . ولعلك تذكر أنه في الميكروسكوب الضوئي تقوم العدسة الشيئية بتكوين صورة للجسم ثم يتم فحص هذه الصورة باستخدام عدسة عينية هي أساسا عدسة مكبرة . وقد روجع هذا الموقف في الجزء (أ) من الشكل ٢٦ - ١٤ . وهناك موقف مشابه في حالة الميكروسكوب الالكتروني كما هو موضح في الشكل ٢٦ - ١٤ ب على أن العدسة الثانية تقوم بتركيز شعاع الالكترونات على سائر فلورى حتى تتكون علية صورة واضحة (كما يحدث على شاشة التلفزيون) ؟ ثم يقوم الفنى بتصوير أو رصد هذه الصورة على السائر . ومن الطبيعى أن يتم سير شعاع الالكترونات في فراغ حتى لا تصادم الالكترونات مع أى شىء . يوضح الشكل ٢٦ - ١٥ ميكروسكوبا نموذجيا وصورة فوتوغرافية التقطت منه . لاحظ أن الميكروسكوب الضوئي لن يكون قادرا على إظهار أية تفاصيل كالتى أعطيت هناك لأن الطول الموجى للضوء أكبر من الأجسام التى يراد رؤيتها .



شكل (٢٦ - ١٤)
تكون الصورة النهائية في
الميكروسكوب الالكتروني
حقيقية ، بينما تكون في العادة
تقديرية في حالة
الميكروسكوب البصرى .





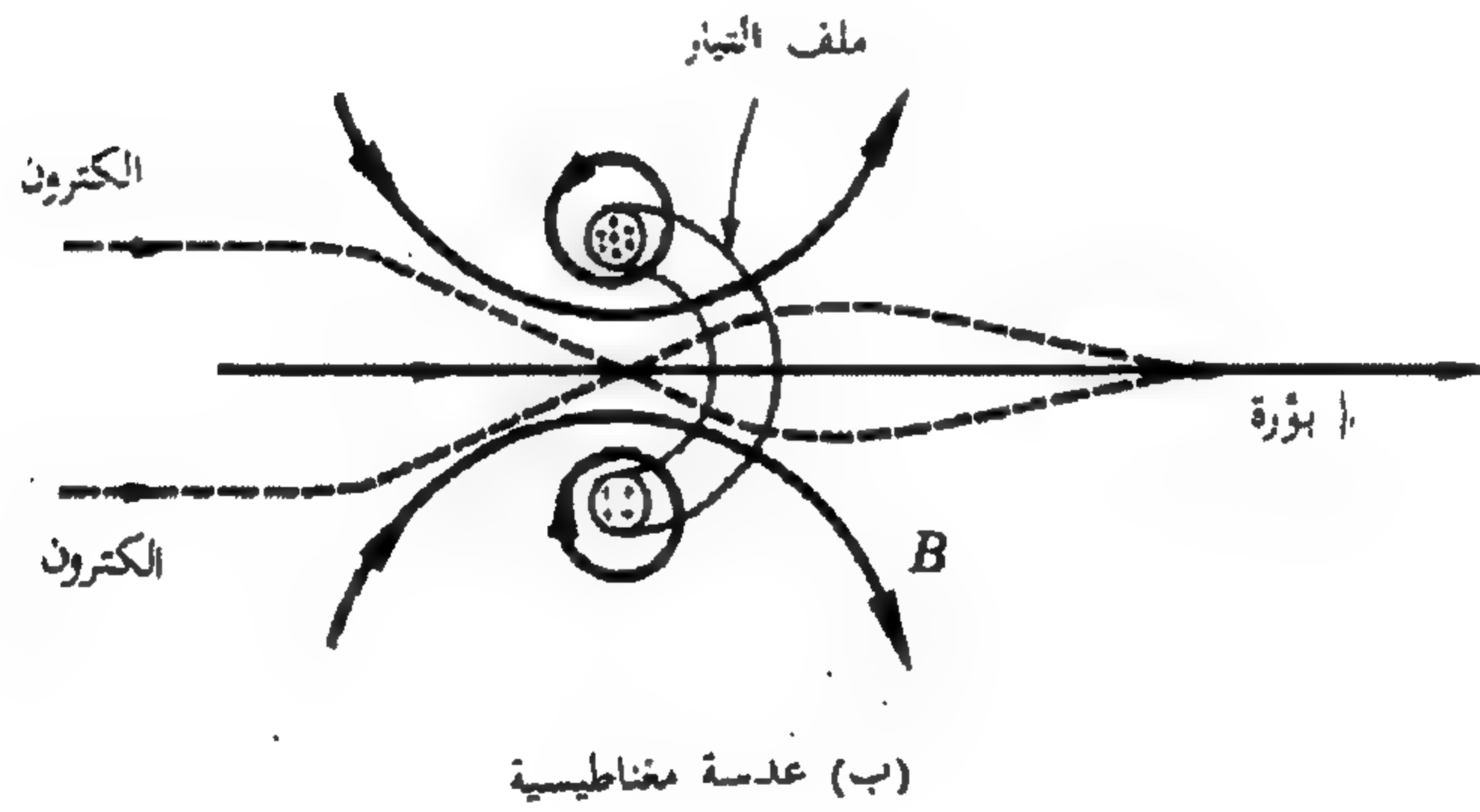
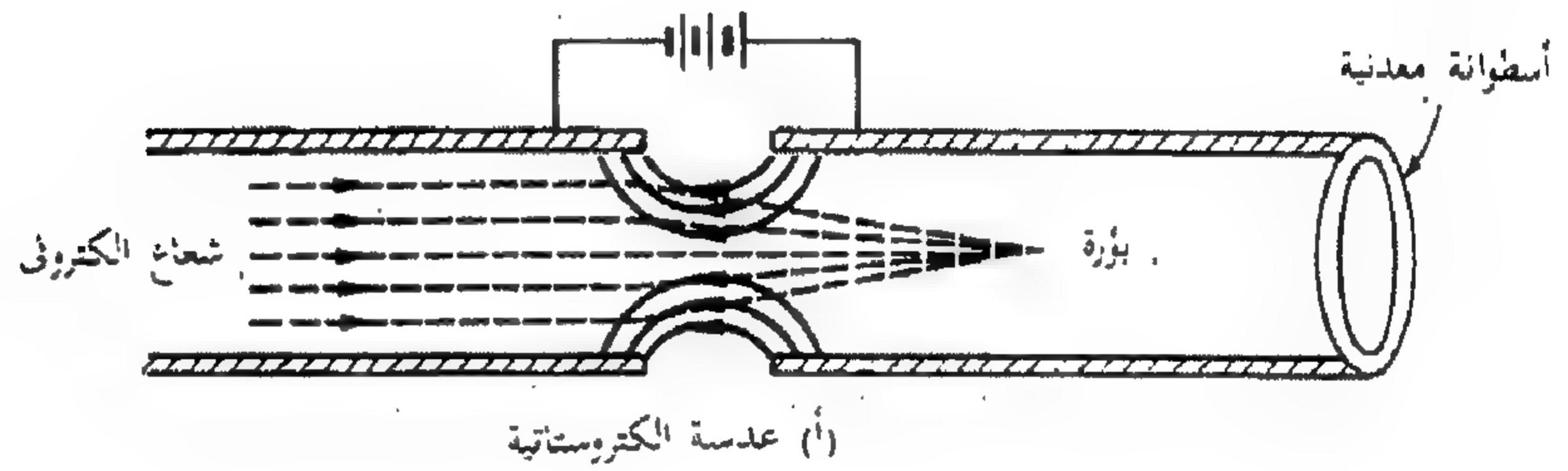
(أ)

شكل (٢٦ - ١٥)

أ. يجعل الشعاع الإلكتروني في هذا الميكروسكوب الإلكتروني في فرق الجهد مقداره $75,000 \text{ V}$ ويمكنه التفريق في حدود 10^{-7} cm . تحتوي الاسطوانات المتراصة في الصورة الفوتوغرافية على عدسات مغناطيسية. أما مصدر الإلكترونات فيوجد عند قمة الميكروسكوب. أما الصورة النهائية المكبرة فتظهر على سائر فلورى عند قاع الميكروسكوب. ويمكن إدخال ألواح فوتوغرافية في هذا المستوى للحصول على سجل فوتوغرافى. يتم التركيز في بؤرة بواسطة تغيير التيار في العدسات المغناطيسية (أخذت الصورة من أم فريمان مؤلف كتاب "الغيزاء": مبادئ وتعمق، ماكجروهيل ١٩٦٨).

(ب) يبلغ قطر كل من جزيئات فيروس البوليو ميليس المصور هنا حوالي 200 \AA (أخذت الصورة بواسطة د.س. ويليامز. معمل الفيروسات. جامعة كاليفورنيا. سركلى).

وقد تكون العدسات الالكترونية في الشكل ٢٦ - ١٤ من نوعين ، الكتروستاتي ومغناطيسي . والعدسة أساسا هي نبيطة لتركيز الشعاع في بؤرة ، وفي هذه الحالة شعاع من الالكترونات (وهي جسيمات مشحونة) . وهذان النوعان من العدسات موضحان في الشكل ٢٦ - ١٦ . وعليك أن تفحص كل رسم منهما لتدرك كيف يتم التركيز في بؤرة . ومن الصعب - للأسف - تصحيح هذه النبيطات ضد عيوب العدسات ولذا فإنه حتى الوقت الحاضر لم يتم تحقيق الحدود النظرية للتفريق في الميكروسكوب الالكتروني عمليا ، فالتفاصيل الأقل من عدة انجسترومات لا يزال من الصعب رصدها على الرغم من أن الميكروسكوب الالكتروني يمكنه من الناحية النظرية أن يرصدها .



شكل (٢٦ - ١٦)

يقوم المجال المغناطيسي B للملف في العدسة المغناطيسية بجعل الالكترونات تسلك مسارا يلتف حول محور الملف في حلزون نصف قطره متضائل .

اكتشف بلانك أن مذبذبا تردده الطبيعي ν_0 يمكن أن يتخذ الطاقات $nh\nu_0$ فقط ، حيث n عدد صحيح . تكون هذه الطاقات متقاربة جدا من بعضها البعض في حالة المذبذبات ذات الحجم الملموس ولذا تظهر كما لو كانت متصلة .

أثبت أينشتاين أن شعاعا من الإشعاع ك.م. يكافئ فيضا من الفوتونات و طاقة كل فوتون هي hc/λ . في التأثير الكهروضوئي يصطدم الفوتون بالكترون داخل الجسم الصلب ولو كانت طاقة الفوتون أكبر من طاقة دالة الشغل فإنه قد يطرد الكترونا من الجسم الصلب . في ظاهرة كومبتون يفقد الفوتون المستطار بعد الاصطدام مع الكترون حر تقريبا جزءا من طاقته ، وهذه الفوتونات المستطارة يكون لها λ أكبر من تلك التي للفوتونات الساقطة .

تقوم النسبية على حقيقتين واضحتين : أن سرعة الضوء في الفراغ هي دائما c حسب تنفيذ القياسات ، وأنه لا يمكن قياس إلا السرعات النسبية . أما الحقيقة الثانية فهي تكافئ القول بأن قوانين الطبيعة هي نفسها في جميع مناطات الإسناد القصورية .

من بين النتائج الهامة التي يمكن الوصول إليها من هذه الحقائق ما يلي : ليس هناك جسم مادي يمكن تعجيله إلى سرعات تزيد على c ، وأن الأحداث المتزامنة في أحد المناطات القصورية قد لا تكون كذلك في مناط آخر ؟ وأن الساعة المتحركة تبدو أبطأ بمعامل قدره $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ، تنكمش أبعاد الأجسام على طول خط الحركة بمعامل قدرة $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ، تتغير كتلة جسم مع سرعته حسب العلاقة $m/m_0 = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ، ترتبط الطاقة والكتلة بالعلاقة $E = mc^2$ ، تكون طاقة الحركة لجسم ما هي $(m - m_0)c^2$ وتختصر هذه الكمية إلى $\frac{1}{2}m_0v^2$ عند السرعات المنخفضة .

تبلغ كتلة السكون للفوتون صفرا أما كمية تحركة فتعطي بالمقدار h/λ طبق دى بروي هذه العلاقة على أجسام مادية فوجد أن جسما يتحرك بسرعة v سيكون له طول موجي $\lambda = h/mv$. مصاحب له . بالنسبة للجسيمات الذرية يكون الطول الموجي من الكبر بحيث يخلق بسهولة تأثيرات يمكن قياسها للتداخل والحيود .

تؤدي الطبيعة الموجية للجسيمات إلى ظهور القانون الطبيعي الذي لخصه مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج وهو يتمثل في العلاقة $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$ and $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$

يهم ميكانيكا الكم بالطبيعة الموجية للمادة ولذا فهي قابلة للتطبيق حتى لو فشلت الميكانيكا الكلاسيكية النيوتونية . ولا تعود للميكانيكا الكلاسيكية صالحة عندما يصبح الطول الموجي للجسيم مقارنا بالأبعاد الهندسية المتضمنة في التجربة .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية .

عند إتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

١ - أن تحسب الطاقات المسموح بها (حسب بلانك) لمذبذب معلوم تردده الطبيعي بشرط أن تعطى ثابت بلانك . وأن تفسر لماذا تبدو طاقة البندول على أنها متصلة .

٢ - أن ترسم العلاقة البيانية بين شدة الإشعاع مقابل λ لجسم ساخن وأن توضح كيف يتغير الرسم البياني بتغير درجات الحرارة .

٣ - أن تصف التأثير الكهروضوئي وتبين ما المقصود بالمشرف الكهروضوئي وأن تذكر طاقة الفوتون بدلالة طوله الموجي . أن تشرح كيف ينطبق مفهوم الفوتون على التأثير الكهروضوئي . أن تحسب الطول الموجي المشرف بمعرفة دالة الشغل .

٤ - أن تصف ظاهرة كومبتون وأن تشرح كيف يمكن تفسيرها بدلالة استطارة الفوتونات .

٥ - أن تذكر فرضي النسبية الأساسيين . أن تشرح معنى مناط الإسناد القصوري وأن تعبر عن الفرض الثاني بدلالة قوانين الطبيعة حين تطبق في مثل هذا المناط .

٦ - أن تذكر النتائج التي تؤدي إليها النسبية من حيث الآتي : السرعة القصوى للأجسام ، الأحداث المتزامنة ، تمدد الزمن ، انكماش الطول ، تغير الكتلة مع السرعة ، ط.ح ، التحول من الطاقة إلى الكتلة . أن تحسب إجابات المسائل البسيطة المتضمنة هذه النتائج .

٧ - أن تذكر ما هي كتلة السكون وكمية التحرك للفوتون .

٨ - أن تذكر الطول الموجي لجسم حسب دى بروي إذا علمت كتلته والسرعة التي يتحرك بها . أن تشرح لماذا تسهل ملاحظة الخواص الموجية للالكترونات بينما لا يمكن ملاحظتها لكرات البيسبول .

- ٩ - أن تذكر الصور المختلفة لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرج بالكلمات ثم بالرموز .
- ١٠ - أن تشرح ماهى الظروف التى تستبدل تحتها ميكانيكا الكم بالميكانيكا النيوتونية الكلاسيكية . وانطلاقاً من تحليل تأثيرات التداخل الملاحظة فى حالة الضوء، بين لماذا تنهار الميكانيكا النيوتونية تحت تلك الظروف .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادراً على تعريف أو شرح كل من :

كم الضوء ، الفوتون
التأثير الكهرضوئى ، الطول الموجى المشرق

دالة الشغل

ظاهرة كومتون

فروض النسبية

مناط الإسناد ، المناط القصورى

تمدد الزمن

معامل النسبية

انكماش الطول (حسب النسبية)

كتلة السكون $m = m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$

$\Delta E = \Delta mc^2$

كمية تحرك الفوتون h/λ

الطول الموجى لدى برولى h/mv

تجربة دافيسون وجيرمر

مبدأ عدم اليقين

الميكروسكوب الالكترونى

أسئلة وتخمينات

- ١ - ناقش كيف يمكن أن يتأثر عالمنا إذا تغيرت الطبيعة فجأة بحيث صار ثابت بلانك أكبر 10^{32} مرة عما هو الآن ، مع اعتبار الموقف من زاويتين . (أ) تكمية طاقة المذبذبات ، (ب) مبدأ عدم اليقين .
- ٢ - كيف تقوم الصورة الفوتونية للضوء بتفسير الملامح التالية للتأثير الكهرضوئى ، (أ) الطول الموجى الحرج ، (ب) جهد الإيقاف يتناسب عكسياً مع الطول الموجى ؟
- ٣ - كيف يمكن قياس دالة الشغل لمعدن ما ؟ وكيف يمكن قياس ثابت بلانك ؟
- ٤ - ضع قائمة بالتجارب التى يسلك فيها الضوء كموجة وقائمة ، بالتجارب التى تكون طبيعته الكمية هى الهامة . هل هاك تجربة فى قائمتك يمكن تفسيرها من كلتى وجهتى النظر ؟
- ٥ - افترض أن ملاحاً فضائياً كانت له المقدرة على معرفة أن شوكة رنانه معينة تعطى صوتاً هو متوسط c عندما تطرق . ما الذى سيسمعه إذا أصغى للشوكة الرنانة عند طرقها داخل سفينة الفضاء التى يستقلها وهى تسير بسرعة $0.9c$ خلال الفضاء ؟
- ٦ - استخدمت شوكة رنانة مهتزة داخل سفينة فضاء لتسجيل الفترات الزمنية قبل مغادرة الأرض عن طريق طبع رقم معين على خريطة بيانية كلما مرت عند منتصفها . هناك نظام مماثل للشوكة الرنانة وله فترة مطابقة وهو يحفظ على الأرض بعد أن ينطلق صاروخ السفينة إلى الفضاء ثم يطير لبضع سنين بسرعة تقارب سرعة الضوء وأخيراً يعود للأرض . ما وجهة المقارنة بين الخريطتين البيائيتين عندما تعود السفينة الى الأرض ؟
- ٧ - يعيش معظم البشر أقل من مائة سنة . وحيث أن السرعة القصوى التى يمكن اكتسابها بالنسبة للأرض هى c ، سرعة الضوء ، لذا فمن المستحيل على أى أنسان على الأرض أن يسافر فى الفضاء لأكثر من مائة سنة ضوئية قبل أن يصير عمره مائة سنة .

هل يعنى هذا بالضرورة أنه لن يستطيع أحد من البشر السفر لأبعد من مائة سنة ضوئية من الأرض ؟ (السنة الضوئية هي المسافة التي يقطعها الضوء في زمن قدره سنة واحدة أو $9.46 \times 10^{15} \text{ m}$)

٨ - افترض أن سرعة الضوء لم تكن سوى 20 m/s وأن كل النتائج النسبية قد طبقت على أساس هذه القيمة لسرعة الضوء c . ناقش كيف كان يمكن لحياتنا أن تتغير .

٩ - تنتقل سفينة فضاء عبر الأرض بسرعة v_{earth} ثم تقوم بقذف قذيفة في خط مستقيم أمامها وبسرعة مقدارها u_{ship} بالنسبة للسفينة كما يراها شخص بداخل السفينة . في حالة السرعات العادية فإن سرعة القذيفة بالنسبة للأرض ستكون $v_{\text{earth}} + u_{\text{ship}}$. أثبت أن هذا غير صحيح لو كانت السرعات نسبية . (العلاقة الصحيحة عند السرعات الهائلة هي

$$\frac{v_{\text{earth}} + u_{\text{ship}}}{1 + v_{\text{earth}}u_{\text{ship}}/c^2}$$

يمكنك معرفة طريقة اشتقاق هذه المعادلة بالرجوع إلى كتب أكثر تقدماً) .

١٠ - يجب أن يكون واضحاً من دراسة هذا الفصل أن النص « المادة لا يمكن أن تستحدث أو تفنى » هو نص زائف . ما البديل الذي يمكنك قوله ؟

١١ - حين يسطع الضوء على سطح عاكس في الفراغ فإن ضغطاً يقع على هذا السطح بواسطة الضوء .

اشرح هذا . هل يكون الضغط مختلفاً لو أن السطح كان أسود بحيث يمتص الضوء ؟

١٢ - لو أن كل طاقة الكتلة للوقود قد استغلت فكم من الكيلوجرامات من الوقود يكفي لتغطية احتياجات مدينة ذات 300,000 نسمة من الطاقة لمدة عام واحد ؟ (ق)

١٣ - لو أننا صدقنا علاقات عدم اليقين فلماذا نرفض تصديق أن كل أنواع الحركة الجزيئية تتوقف عند الصفر المطلق لدرجات الحرارة ؟

١٤ - قدر التغير في القدرة لنظام هوائى تابع لمحطة إذاعة محلية عندما تتغير من حالة طاقة تذبذب مكماة الى حالة أخرى مجاورة . ما هي فوتونات الطاقة التي تشعها المحطة ؟ وم يبلغ طولها الموجي ؟ وما التردد ؟ (ق)

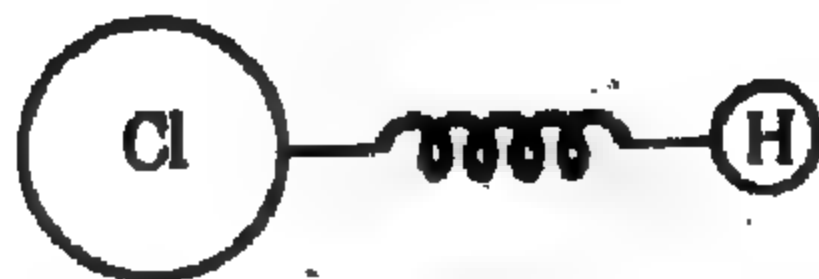
١٥ - يسبب الضوء فوق البنفسجي لفحة الشمس أما الضوء المرئى فلا يسببها . اشرح السبب . يعد بعض الناس أن جلودهم تلمح بالشمس أسهل ما يمكن عندما تكون مبتلة . هل ترى أن هناك سبباً ما لذلك ؟

مسائل

١ - يتصرف جزيء كلوريد الهيدروجين في كثير من الاحيان مثل كرتين يربطهما زنبرك كما في الشكل م ٢٦ - ١ وهو يهتز جيئة وذهاباً (عند مط الزنبرك وكبسه) بتردد طبيعى يبلغ $8.5 \times 10^{13} \text{ Hz}$. ما هي فجوة الطاقة بين الطبقات المسموحة لهذا المذبذب ؟ عبر عن إجابتك بكل من الجول والالكترون فولت .

٢ - يمتز الهليوم نيون ضوءاً أحمر طول الموجي $\lambda = 6.328 \times 10^{-7} \text{ m}$ ما هي طاقة الفوتون في مثل ذلك الشعاع ؟ عبر عن إجابتك بكل من الجول والالكترون فولت .

٣ - من المناسب تذكر أن الفوتونات التي طاقتها 1 eV يكون طولها الموجي 1240 nm (أ) أثبت هذه الحقيقة . (ب) أى أجزاء الطيف هذا ؟ (ج) ما هو الطول الموجي المناظر لفوتون طاقته 3 eV ؟



شكل (م ٢٦ - ١)

- ٤ - اوجد دالة الشغل لمادة الطول الموجى المشرفى لها هو $3.3 \times 10^{-7} \text{ m}$ ، عبر عن إجابتك بالالكترون فولت .
- ٥ - (أ) اوجد الطول الموجى المشرفى لمادة (الذهب) الذى دالة شغله هي 4.8 eV . (ب) فى أى أجزاء الطيف يقع هذا الطول الموجى ؟
- ٦ - (أ) اوجد طاقة كات موجة ك.م. تبعث بها محطة اذاعة تعمل عند تردد 1 Mc . عبر عن الإجابة بالالكترون فولت . (ب) كم تبلغ سرعة الكترون له مثل هذه الطاقة الحركية ؟
- ٧ - يبلغ متوسط ط.ح الحرارية الانتقالية لجسيم ما $\frac{3}{2}kT$ (أ) كم يبلغ الطول الموجى لفوتون يكافئ هذا المتوسط للطاقة الحرارية عند 27°C . (ب) أى أنواع الإشعاع هذا ؟
- ٨ - يسطع ضوء طوله الموجى 400 nm على سطح دالة شغله 2.0 eV اوجد سرعة أسرع الالكترونات الكهروضوئية المبتعثة من السطح .
- ٩ - يبلغ جهد إيقاف لمادة ما 0.30 V حين يقاس بواسطة إسقاط ضوء طوله الموجى 400 nm على سطح المادة . ما هي دالة الشغل لهذه المادة ؟
- ١٠ - تبلغ طاقة رابطة الكربون - كربون لجزء عضوى حوالى 80 kcal/mol . لو أمكن استخدام كل طاقة فوتون ما لكسر هذه الرابطة فما الطول الموجى لتلك الفوتونات اللازمة لإنجاز هذه المهمة بالضبط ؟
- تلميح : 80 kcal/mol تساوى $80,000 / (6 \times 10^{23}) \text{ cal per bond}$
- ١١ - تلزم طاقة مقدارها 13.6 eV لإطلاق سراح الكترون من ذرة الهيدروجين أى لتأين الذرة . لو أن هذا تم عن طريق صك الذرة بواسطة فوتون ، فما هو أطول طول موجى لفوتون يستطيع إنجاز هذه المهمة ؟ (اعتبر أن كل طاقة الفوتون فعالة) .
- ١٢ - حسب التقديرات الفلكية الأرضية تبلغ المسافة إلى النجم اركتوروس (السماك الداح) حوالى 40 سنة ضوئية . كم من السنين تلزم سفينة فضاء كى تصل إلى هناك إذا كانت سرعتها تبلغ $0.990c$ بالنسبة للأرض وذلك حسب (أ) الساعات الأرضية و (ب) ساعات سفينة الفضاء ؟
- ١٣ - يعيش النيوترون الوحيد الساكن حوالى 1000 s قبل أن يتغير إلى شئ ما آخر . هل يمكن لنيوترون قذف من الشمس بسرعة $0.995c$ أن يصل إلى كوكب زحل قبل أن يغير صورته ؟ (يبعد كوكب زحل عن الشمس حوالى $1.5 \times 10^{12} \text{ m}$) .
- ١٤ - يعيش ميزون K^+ حوالى 10^{-8} s قبل أن يغير صورته . كم يجب أن تكون سرعة هذا الميزون خلال المعمل حتى يمكنه أن يعيش ليقطع طول المعمل البالغ 15 m ؟
- ١٥ - تعجل الجسيمات فى المعجلات النووية الحديثة أحيانا الى طاقات تبلغ بلايينا من الالكترون فولت (أ) ما هي كتلة بروتون طاقته $2 \times 10^9 \text{ eV}$ ؟ (ب) كم تبلغ سرعته ؟ ($m_0 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ Kg}$)
- ١٦ - تلزم طاقة مقدارها 80 cal لازابة 1 g من الثلج عند درجة حرارة 0°C . ما مقدار الزيادة فى كتلة الثلج بسبب الطاقة التى استخدمت لازابته ؟
- ١٧ - يقول الكيميائيون أحيانا أن « كتلة المواد الداخلة فى التفاعل تساوى كتلة المواد الناتجة » فى تفاعل كيميائى . عند إحراق 2 g من الاليدورجين مع 16 g من الأكسجين لتكوين 18 g من الماء فإن التفاعل ينتج عنه أيضا $60,000 \text{ cal}$ من الطاقة الحرارية . ما مقدار الكتلة المفقودة فى العملية ؟
- ١٨ - عند السرعات المنخفضة لو أن رجلا يتحرك بسرعة v بالنسبة للأرض يقذف قذيفة على طول خط حركته بسرعة u بالنسبة لنفسه ، فإن سرعة القذيفة بالنسبة للأرض ستكون ببساطة $v + u$ ولا يمكن أن يكون هذا صحيحا عند السرعات القريبة من c ، وذلك لأن سرعات أكبر c سيتمكن عندئذ التنبؤ بها (لو كانت $v = 0.7c$ مثلا وكانت $u = 0.7c$ فإن السرعة بالنسبة للأرض ستكون $1.4c$ وهذا مستحيل) . وقد بين أينشتين أن السرعة فى هذه الحالة ستعطى بالمعادلة :

$$\frac{v + u}{1 + vu/c^2}$$

والآن ، لو أن سفينة فضاء سرعتها $0.7c$ عبر الأرض وتقذف قذيفة من داخلها في اتجاه خط حركتها بسرعة $0.9c$ فما هي سرعة القذيفة بالنسبة للأرض ؟

١٩ - كرر المسألة رقم ١٨ مع استبدال نبضة ضوء بالقذيفة .

٢٠ - ما هو الطول الموجي المصاحب لالكترون هبط في فرق للجهد مقداره $6V$ ؟

٢١ - يبلغ نصف قطر الذرات حوالى 1 \AA . كم تبلغ سرعة الكترون إذا كان الطول الموجي المصاحب له أصغر من 1 \AA ؟

٢٢ - يبلغ قطر النوى حوالى $4 \times 10^{-15} \text{ m}$ ، ولكي يمكن للنيوترون أن يتواجد بداخل النواة يلزم أن يكون عدم اليقين المتأصل في موضعه أقل من $4 \times 10^{-15} \text{ m}$ ، ويعنى هذا أن يكون الطول الموجي المصاحب للنيوترون أقل من هذا المقدار . اوجد - بإهمال التأثيرات النسبية - السرعة التى يجب أن يتحرك بها النيوترون حتى يصبح الطول الموجي المصاحب له هو $1 \times 10^{-15} \text{ m}$ (كتلة النيوترون $= 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$)

٢٣ - فوتون طوله الموجى λ يصدم الكترونا (ساكنا في البداية) صدمة مباشرة ثم يرتد الإثنان بمرونة . بافتراض أن الحركة كلها قد تمت على طول نفس الخط المستقيم ، (أ) بين أن السرعة v للالكترون بعد التصادم والطول الموجى النهائى للفوتون تعطى بالمعادلات : بشرط أن $v \ll c$

$$v = \frac{1.46 \times 10^{-3}}{\lambda} \text{ m/s}$$

و

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda} - \frac{mv^2}{2hc}$$

(ب) احسب كلا من v و λ' إذا كانت $\lambda = 1.00 \text{ nm}$

الفصل السابع والعشرون

التركيب الذرى وابتعاث الضوء

رأينا فى الفصل السابق أن السنوات التى تلت عام ١٩٠٠ شهدت تقدماً سريعاً فى الفيزياء . وسنرى فى هذا الفصل كيف امتدت هذه التطورات لتفسير تركيب الذرات وتفاعلها مع الموجات الكهرمغناطيسية . ولكن قبل أن نبدأ هذا سنتكلم أولاً عن تجربة هامة أسهمت إسهاماً ضخماً فى فهمنا للتركيب الذرى .

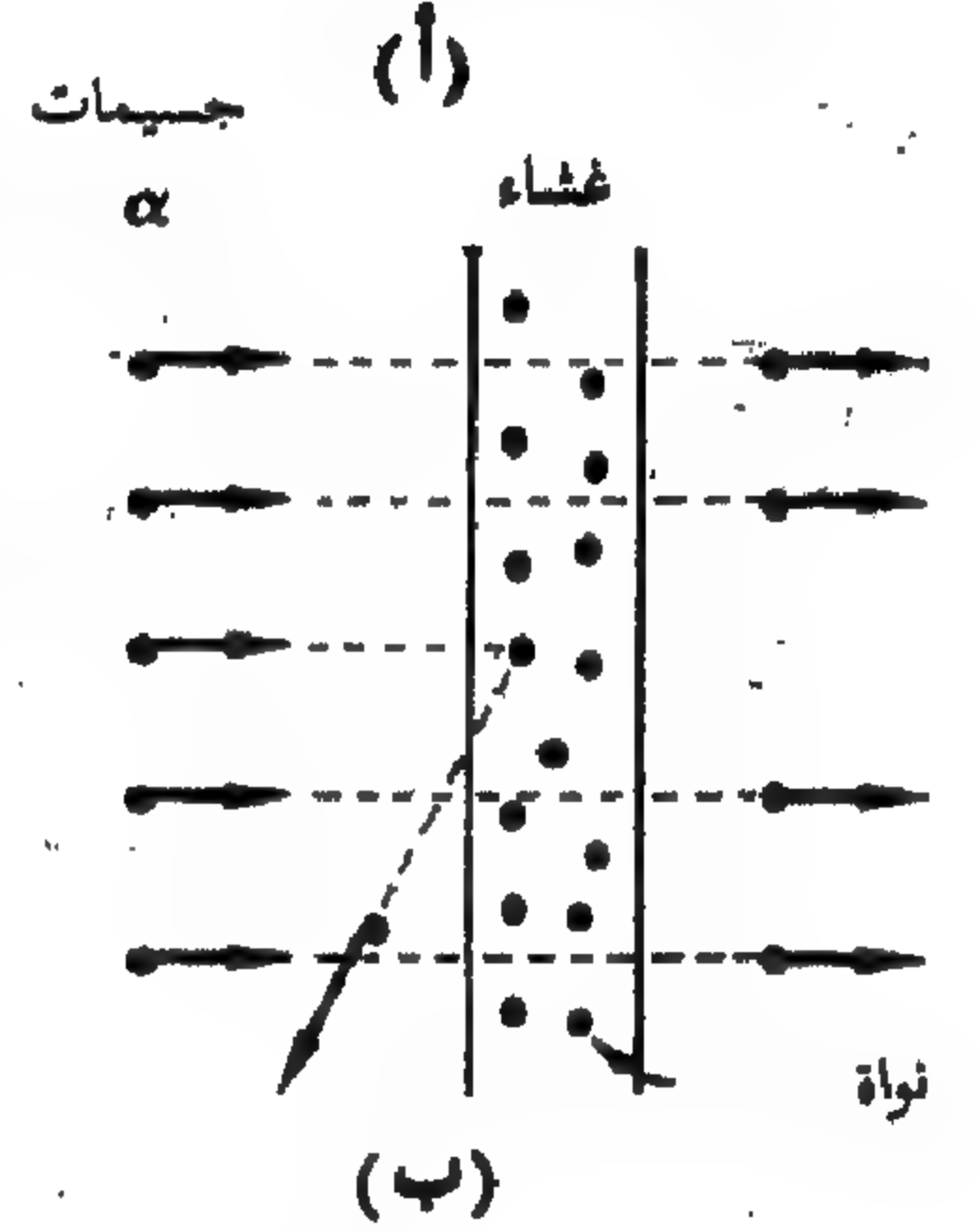
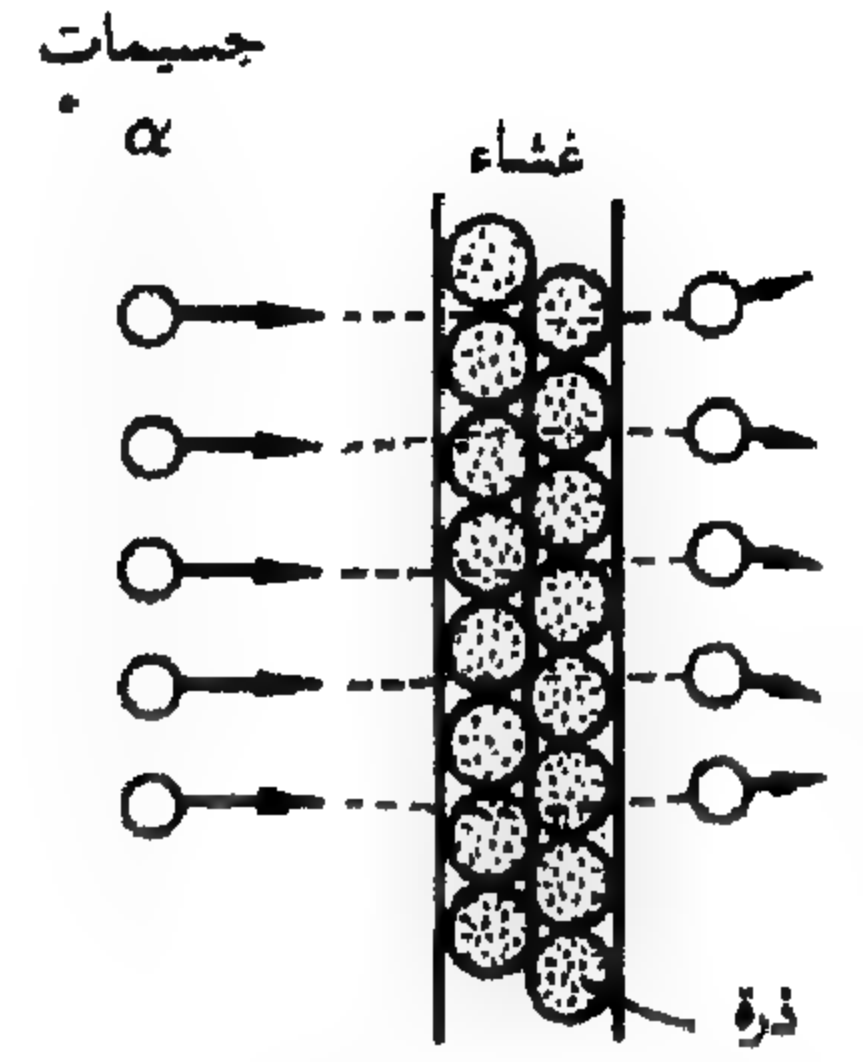
٢٧ - ١ الذرة النووية

ظل التركيب الذري حتى مطلع هذا القرن غامضاً . وقد كان من المعروف أن كل ذرة يصطحبها عدد من الالكترونات Z مساو للعدد الذري للعنصر المقصود . ولما كانت كل ذرة متعادلة كهربياً ، لذا فالشحنة $-Ze$ التي تحملها الالكترونات في ذرة ما يجب أن تتوازن مع شحنة موجبة مقدارها $+Ze$ ، وبالإضافة إلى ذلك يشكل هذا العدد Z من الالكترونات جزءاً ضئيلاً جداً من الكتلة الكلية للذرة ، ومن ثم فلا بد أن تحتوى الذرة إلى جانب الالكترونات على كتلة تقارب كتلة الذرة نفسها وشحنة موجبة مقدارها Ze .

لقد تمت معرفة كيف تترتب الالكترونات والشحنات الموجبة والكتلة داخل الذرات لأول مرة على يد ارنست رذرفورد ومساعديه عام ١٩١١ من خلال التجارب القاطعة التي أجروها . وتبدو في الشكل ٢٧ - ١ الفكرة الأساسية وراء هذه التجارب . فهناك شعاع من جسيمات (جسيمات ألفا) يسقط على غشاء رقيق من ذرات الذهب . وهذه الجسيمات تنبعث من عنصر الراديوم المشع . تحمل هذه الجسيمات شحنة $+2e$ كما هو معروف ، أما كتلتها فتساوى تقريباً كتلة الذرة التي تلى أصغر الذرات وهي الهليوم . حيث أن ذرة الذهب لها كتلة تبلغ خمسين ضعفاً لكتلة جسيم ألفا ، لذا يمكن تصور الموقف كما هو مبين في الشكل ٢٧ - ١ .

يسمى نموذج الذرة المبين في الشكل نموذج طومسون للذرة (نسبة إلى أول من اقترحه ج.ج. طومسون) . ويفترض في هذا النموذج أن الذرة تتكون من كتلة كروية متجانسة إلى حد ما تحتوى على الشحنات الموجبة والسالبة للذرة وهي موزعة بداخلها . وحيث أن الغشاء المستخدم هدفاً كان سمكة يبلغ حوالى مائة ذرة ، لذا فنموذج طومسون كان يتنبأ بأن جسيم α سيعطى وقد يتوقف تماماً في الغشاء ، في حين أن النتائج العملية بدت مختلفة تماماً .

لقد وجد ، في المقام الأول ، أن نسبة مئوية ضئيلة فقط من جسيمات α هي التي تأثرت على الإطلاق لوجود الغشاء . وبدا الأمر كما لو كان الغشاء مليئاً بالثقوب التي نفذت معظم جسيمات α من خلالها وكل ما طرأ عليها هو بعض الإبطاء - إن وجد . أما النتيجة الثانية غير المتوقعة فكانت حول تلك النسبة الضئيلة من الجسيمات التي بدت وكأنها تصادمت مع شيء ما ، فبعضها انحرف بزوايا كبيرة جداً كما لو كانت قد اصطدمت بشيء جسيم . وعلى سبيل المثال انحرفت بعض الجسيمات عائدة إلى الخلف تقريباً كما في الشكل ٢٧ - ١ (ب) .

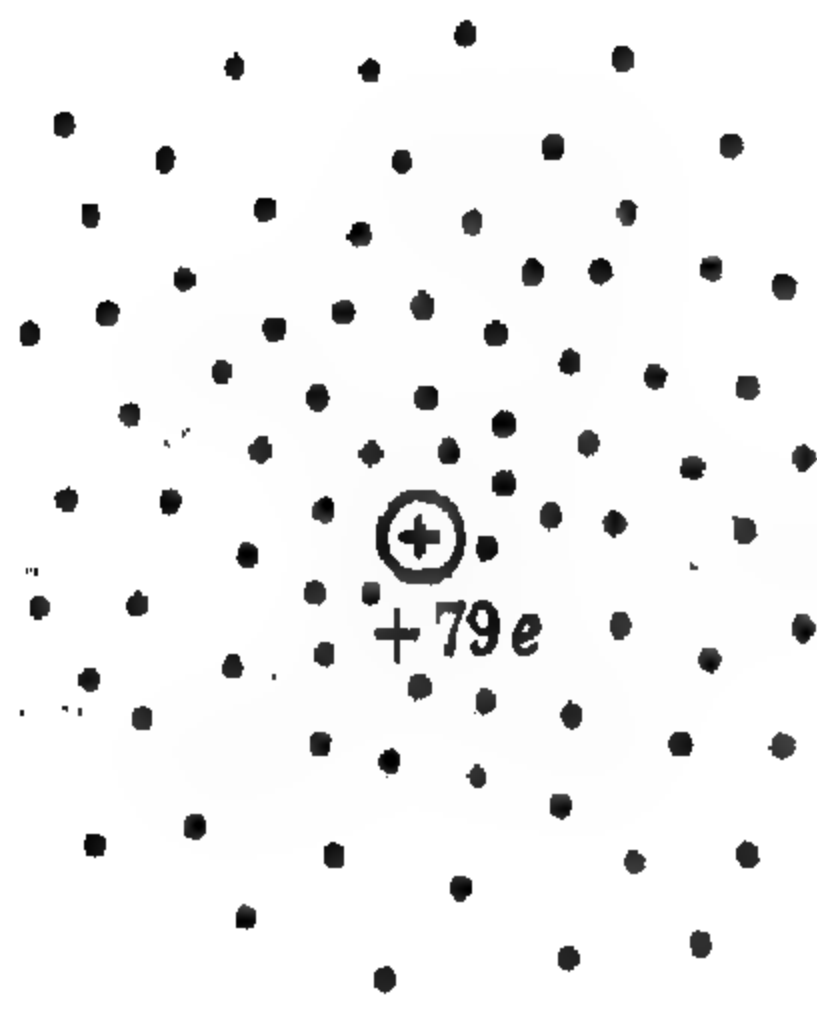


شكل (٢٧ - ١)

(أ) حسب نموذج طومسون للذرة فإن جسيمات ألفا الساقطة يجب أن تنحرف انحرافاً ضئيلاً . (ب) أما رذرفورد فقد لاحظ هذه النتيجة في الواقع ، حجم النواة مبالغ فيه والالكترونات غير مبينة بالرسم .

ولكى يفسر هذه النتائج افترض رذرفورد ما يسمى بالذرة النووية ، وقد دلت تجاربه على أن الذرة لا بد وأن تحتوى على قلب ضئيل ولكنه ثقيل جدا ، يحمل كل شحنة الذرة الموجبة كما يحمل كل كتلتها تقريبا . ويبلغ قطر تلك الكرة موجبة الشحنة (أو النواة) حوالى 10^{-14} m أو أقل عند مركز الذرة . على أن قطر الذرات كما يحسب من كثافة البللورات يصل كما هو معروف إلى 10^{-10} m . أى أن النواة لو صورت على أنها كرة موجبة الشحنة وقطرها 1 mm تقريبا فإن الذرة إذا رسمت بنفس مقياس الرسم لكان نصف قطرها حوالى 10 m . لذا يصبح مستحيلا علينا أن نرسم شكلا بمقياس رسم مناسب للذرة النووية ، وذلك لأنه لو رسمت الذرة داخل الصفحة فإن النواة ستكون أصغر من أن ترى .

العدد الذرى وعدد الالكترونات



لقد كانت ذرات الجدول الدورى معروفة من سلوكها الكيميائى بأنها تحتوى على عدد من الالكترونات يساوى العدد الذرى لذلك العنصر . فالإيدروجين مثلا هو أول عنصر فى الجدول الدورى ولما كان عدده الذرى 1 فإنه يمتلك الكترونا واحدا . وبالمثل ، فالذهب هو العنصر التاسع والسبعون فى الجدول وهو لهذا يمتلك 79 الكترونا . وقد افترض رذرفورد أنه لما كانت الذرة متعادلة كهربيا ، فإن النواة يجب أن تحمل شحنة قدرها $+79e$ ويحتوى الحيز الضخم خارج النواة على 79 الكترونا للذرة كما هو مبين تخطيطيا فى الشكل ٢٧ - ٢ . ولما كانت الالكترونات صغيرة جدا أيضا فإن الجزء الرئيسى من الذرة يبدو وكأنه فراغ لا يسبب أى انحراف للجسيمات المقذوفة . ومنذ زمن رذرفورد ، أخذت الصورة النووية للذرة التى وضعها تتأكد تماما مع الأيام . وسنستخدم هذا النموذج لشرح نواح أخرى لسلوك الذرى .

وبوضح الشكل ٢٧ - ٣ صورة تخطيطية لذرة الكربون تتفق مع نتائج رذرفورد . وحجم النواة والالكترونات لن يزيد على حجم وخزات دبوس إذا ما كان حجم الذرة كما هو موضح بالشكل ، على أن الصورة المعطاة لا يمكن قبولها كما هى لأنها ليست متزنة ميكانيكيا . فالنواة الموجبة تقوم بجذب الالكترونات السالبة التى ستلتحم بالنواة وتتعاذل . ويمكن فى الواقع إثبات أن القوى الالكتروستاتية بمفردها ليست قادرة على الاحتفاظ بمجموعة ساكنة من الشحنات فى وضع اتزان استاتى ، ومن ثم فلا سبيل إلى ترتيب الالكترونات الساكنة والنواة فى الفضاء بحيث تظل مثبتة فى أماكنها .

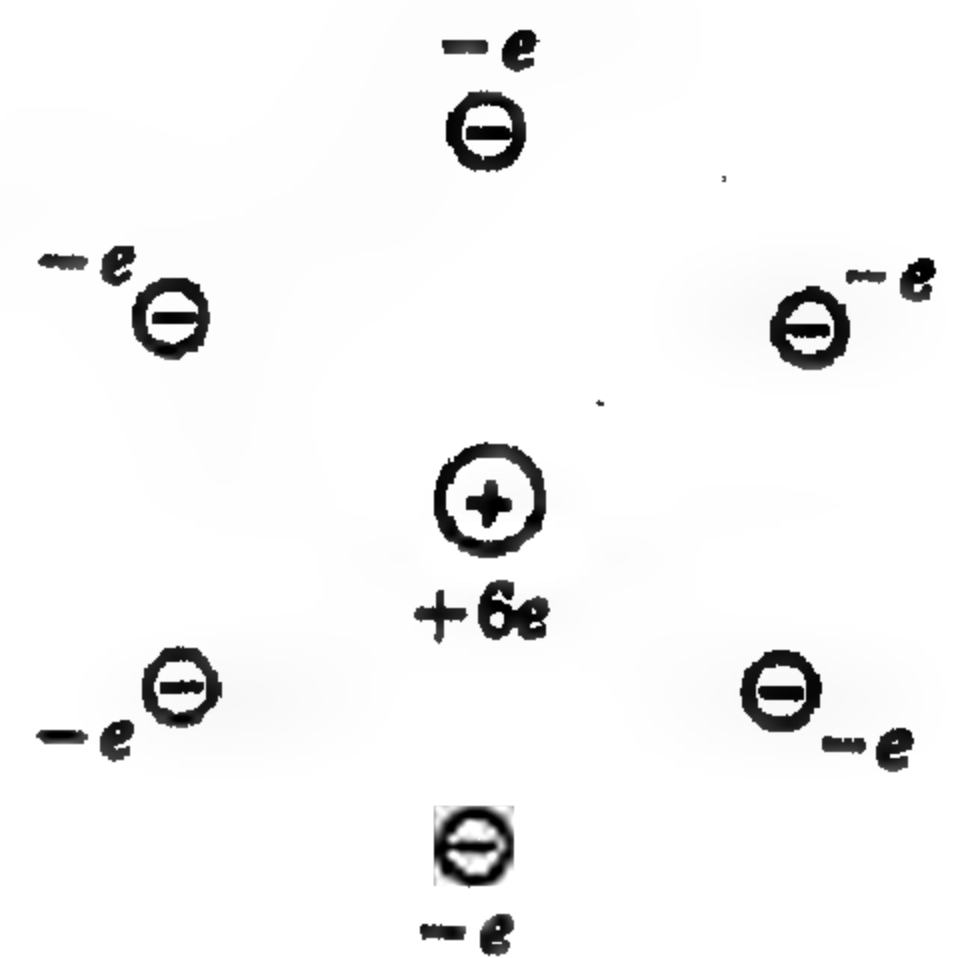
وقد نفترض أن الالكترونات ربما كانت تلف حول النواة بنفس الطريقة التى تلف بها الكواكب حول الشمس ، وتقوم قوى التريب العكسى للجذب بتوفير قوة الجذب

* يمكن إيجاد عدد الذرات فى وحدة الحجم بقسمة الكتلة لوحدة الحجم ، أى الكثافة على وزن ذرة واحدة . ويمكن بعد ذلك اعتبار الحجم الذى تشغله ذرة واحدة على أنه مقلوب عدد الذرات لوحدة الحجم .

المركزي اللازمة للإمساك بالكواكب في مداراتها . ويمكن تطبيق نفس الموقف بالنسبة للذرة مع استخدام جذب التوزيع العكسي الكولومى بدلا من قوى الجذب . وعلى الرغم من أن هذه الفكرة لها ما يجذبها ، إلا أنه كان هناك سبب طاع لعدم تصديقها .

حين يدور الالكترتون حول نواة موجبة فإنه يخلق فعليا زوجا متذبذبا من الشحنات وتتنبأ معادلات ماكسويل بأن مجموعة الشحنات المتذبذبة تنتج أمواجاً كهرومغناطيسية بنفس الطريقة التي ناقشناها في حالة الهوائى . أما إذا أشع المذبذب الذرى طاقة ، فإن مصيره الى الهبوط ، أى أن الالكترونات ستدور فى حلزون حول النواة حتى تحط عليها وتنهار الذرة ، وحيث أن شيئا من هذا لا يحدث فإن الفكرة من أساسها تكون خاطئة .

من ناحية أخرى ، لو أن الذرة أشعت فعلا طاقة ، فإن هذا يكون تفسيراً مناسباً لحقيقة أن الذرات تبعث ضوءاً فى بعض الأحيان . ومع هذا فإن التردد سوف يتغير لسوء الحظ عندما يهبط الالكترتون للداخل نحو النواة مناقضاً بهذا حقيقة أن ذرة معينة سوف تشع أطوالاً موجية محددة بشكل دقيق جداً . وكما ترى فالموقف عام ١٩١٣ كان أبعد ما يكون عن الرضا وظل الناس وقتها يتحسسون إجابة شافية لهذه المشكلة .



شكل (٢ - ٣)
صورة ممكنة ولكنها غير
صحيحة للذرة الكربون .

٢٧ - ٢ طيف الایدروجين

على الرغم من أن الميكانيكا الذرية لم تكن مفهومة جيداً عام ١٩١٣ إلا أنه كانت هناك بيانات متاحة مفصلة ودقيقة عن الضوء الذى يصدر عن الذرات فقد شاع استعمال الاسبكترومترات (المطاييف) ذات المنشور وذات المحزوز لسنوات عديدة . وصار مجال الأطياف البصرية (أى ابتعاث الضوء من الذرات والجزيئات) مجالاً للبحث المعملى الدعوب . وقد وجد الباحثون - من حيث المبدأ - أن أية كتلة غازية من الذرات يمكن جعلها تبعث ضوءاً إذا أمرت فيها شرارة أو تفريغ بواسطة مجسين عند جهد مرتفع . أما بالنسبة للمواد الصلبة بطبيعتها فإن الكتلة الغازية يمكن تدويرها عن طريق تبخير الجسم الصلب فى قوس ساخن . ويمكن بعد ذلك دراسة الأطوال الموجية للضوء الصادر عن هذه الغازات الساخنة أى طيفها باستخدام سبكترومتر (مطياف) كما رأينا فى القسم ٢٥-٧ .

لما كان الایدروجين هو أبسط الذرات جميعاً - إذ يحتوى على الكترون واحد - لذا كان من الطبيعى أن يحظى طيفه بعظيم الاهتمام . وكما أتضح فإن هذه الذرة لها فعلاً طيف بسيط يتكون - كما وجد بالقياس - من متسلسلة من خطوط الطيف المبينة فى الشكل ٢٧-٤ . (لعلنا نذكر من القسم ٢٥ - ٧ أن خط الطيف هو فى الواقع

صورة لشق السبكترومتر (المطياف) وأن كل طول موجي يعطى صورة منفصلة (وتظهر الخطوط التي تقع في المدى فوق البنفسجي القريب في الصور الفوتوغرافية فقط بالطبع .

لاحظ أن الخطوط ذات الأطوال الموجية الأقصر تتقارب مع بعضها أكثر فأكثر ومع هذا فليس هناك خطوط طولها الموجي أقصر من $\lambda_0 = 364.6 \text{ nm}$ (في هذه المنطقة) ، وأن أقصر طول موجي هذا للمتسلسلة يسمى حد المتسلسلة ، وحسب النظرية التي سنعرضها حالا فإن عدد الخطوط في هذه المتسلسلة يجب أن يكون لانهايا . أما ماتم تفرقه فهو 40 خطأ . أما الباقيون فمتلاصقون جدا لدرجة يصعب تمييز أحدهم عن الآخر .

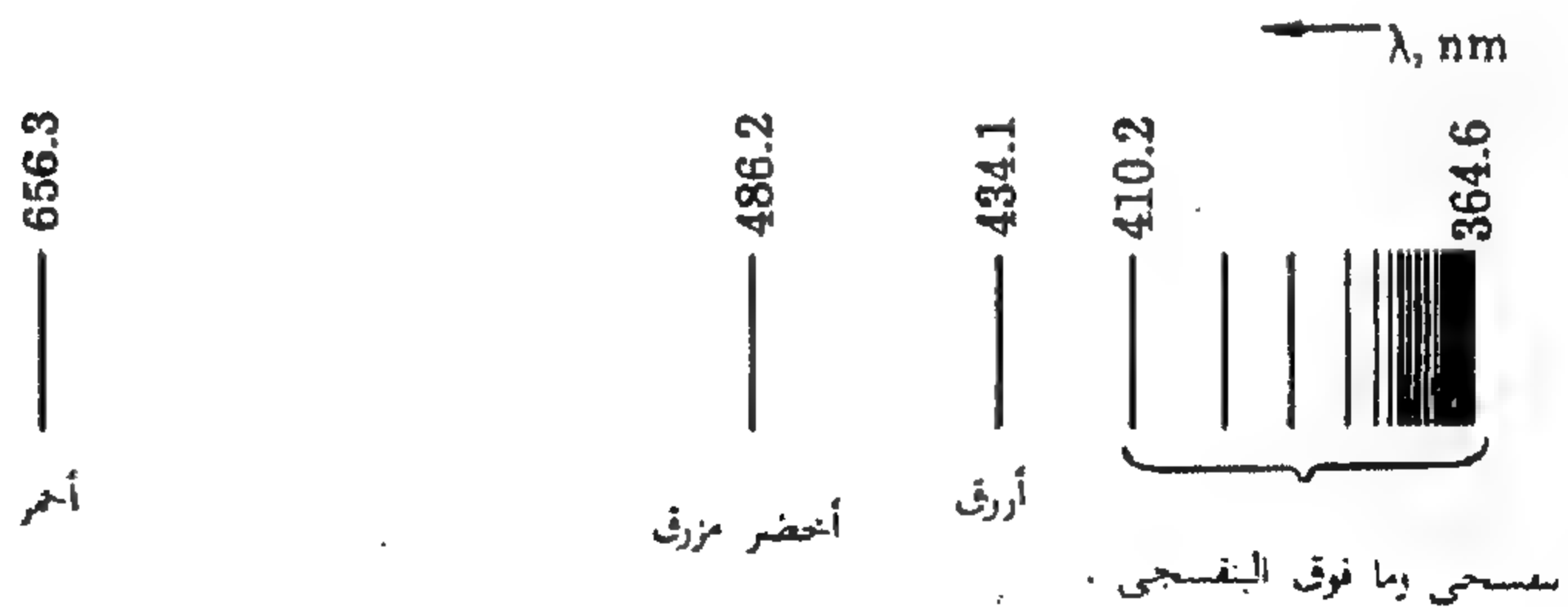
حيث أن خطوط الطيف هذه بدت وكان لها نوع محدد من النظام ، فقد يكون من الطبيعي أن تصاغ أطوالها الموجية في صيغة تجريبية . وقد تم هذا على يد بالمر حوالي عام ١٨٨٥ وسميت هذه المتسلسلة باسمه ، متسلسلة بالمر ، فقد وجد أن الأطوال الموجية للخطوط يمكن التعبير عنها بالصيغة التالية المتناهية في البساطة .

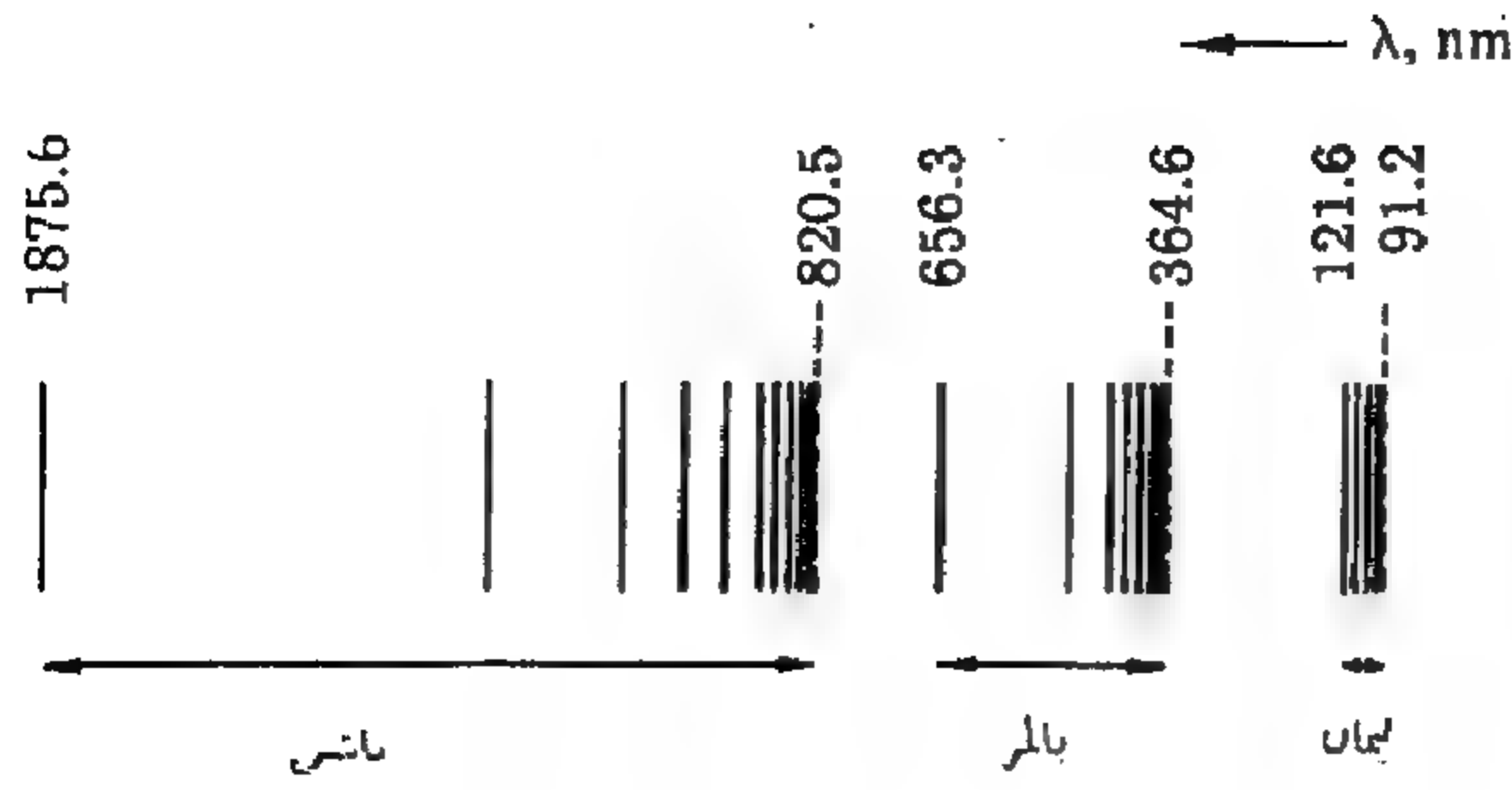
صيغة متسلسلة بالمر

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad ٢٧ - ١$$

حيث R مقدار ثابت قيمته $1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ واخ $n = 3, 4, 5, \dots$ أما 2^2 فهي ببساطة 4 . إذا وضعنا $n = 3$ لوجدنا أن $\lambda = 656 \text{ nm}$ حسب هذه الصيغة ، وهذا هو أيضا أول خط في متسلسلة بالمر وهو موضح في الشكل ٢٧ - ٤ . أما $n = 4$ فيعطى $\lambda = 486.2 \text{ nm}$ وهكذا . تؤدي الأعداد الصحيحة ابتداء من 3 إلى ما لا نهاية إلى خطوط متسلسلة بالمر حين نعوض بها في الصيغة (٢٧ - ١) . عند وضع $n = \infty$ فإن الصيغة تؤدي إلى حد المتسلسلة وهو 364.6 nm . والثابت التجريبي R يسمى ثابت رايدبرج تخليدا لاسم الرجل الذي عين قيمة هذا الثابت بدقة . ومن المعتاد أن يرمز إلى خطوط هذه المتسلسلة كالتالي : خط H_α ، خط H_β ، خط H_γ وهكذا .

شكل (٢٧ - ٤)
متسلسلة بالمر لخطوط
الأيدروجين ،





شكل (٢٧ ٥)
أفصر ثلاث متسلسلات
طيفية للخطوط الصادرة عن
ذرات الأيدروجين

وقد وجد فيما بعد أن ذرات الأيدروجين تبتعث أطوالاً موجية غير تلك التي وجدت في متسلسلة بالمر ، فتقع متسلسلة ليمان في المنطقة القصية لفوق البنفسجي بينما تقع متسلسلة باشن في المنطقة تحت الحمراء . وهذه المتسلسلات موضحة في الشكل ٢٧ - ٥ . وقد وجدت متسلسلات أخرى أبعد من هذه داخل المنطقة تحت الحمراء . ومن المدهش أن هذه المتسلسلات تتبع أيضاً صيغاً شبيهة جداً بصيغة بالمر ، فلقد وجد أن

$$\text{Lyman: } \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, \dots$$

$$\text{Balmer: } \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, \dots$$

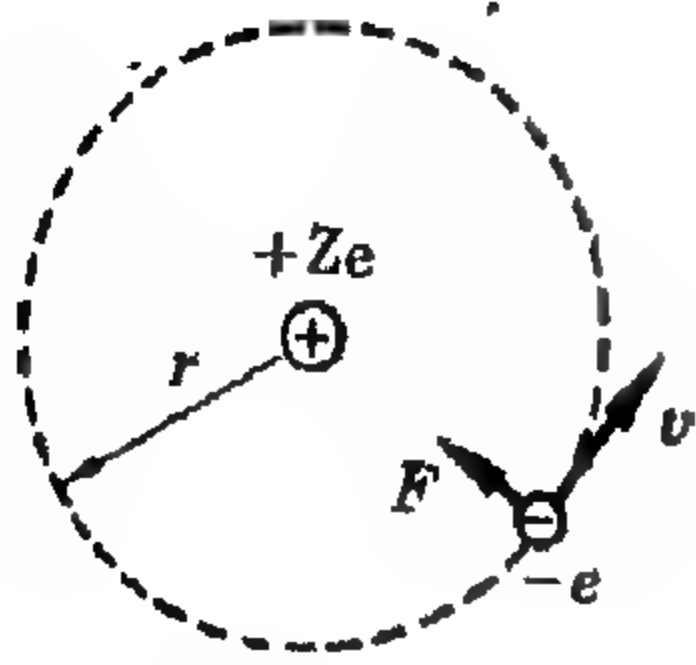
$$\text{Paschen: } \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, \dots$$

وهكذا ، حيث $R = 1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$.

حقيقة أنها ليست مجرد مصادفة أن تنطبق هذه الصيغ البسيطة على ظاهرة معقدة كابتعاث الضوء . فمن الواضح أن هناك الكثير من البساطة في السلوك الذري يعتبر مسئولاً عن هذه المجموعة الجديرة بالملاحظة من العلاقات ، ولذا فهي كفيلة بأن تكون اختباراً بسيطاً للنظريات الذرية . وكما سنرى فإنها قد أمدت نيلز بوهر بالأدلة اللازمة لوضع أول تصور يمكن العمل به للذرة .

٢٧ - ٣ ذرة بوهر

في عام ١٩١٣ ، وعندما كان نيلز بوهر يبلغ من العمر ثمانية وعشرين عاماً ، وهو لا يزال طالب بحث في كمبريدج ، تقدم بصورة جديدة لذرة الأيدروجين . وقد بنى هذه الصورة على أساس الكترون يدور في مدار دائري حول النواة كمركز للدوران .



وقد وفر التجاذب الكهربى بين النواة والالكترون قوى الجذب المطلوبة للإمساك بالالكترون فى مداره . وهذا المفهوم موضح فى الشكل ٢٧ - ٦ حيث اعتبرت الشحنة على النواة على أنها Ze . وفى حالة ذرة الأيدروجين يعتبر العدد الذرى Z يساوى الواحد الصحيح .

يفيدنا قانون كولوم بأن القوة الكهربائية المؤثرة على الالكترون هى $k(Ze^2/r^2)$ وتوجه نحو المركز ، حيث k مقدار ثابت قيمته $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ وهذه القوة توفر قوى الجذب المركزى mv^2/r ومن ثم يمكننا أن نكتب

$$\frac{kZe^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

وسعيا وراء mv^2 نجد أن ،

$$mv^2 = \frac{kZe^2}{r} \quad \text{٢٧ - ٣}$$

وليس فى هذه الأفكار شىء جديد بالطبع ، فكما قلنا منذ قليل فى بداية هذا الفصل ، أن الالكترون المتذبذب يجب أن يشع طاقة ومن ثم تتحدر الذرة ثم تنهار . ولهذا السبب لم تقبل هذه الصورة العامة بشكل عريض . وللتحايل على هذه المشكلة اتخذ بوهر موقفا بأنه ربما كانت الذرة لا تخضع للقوانين الكهربائية العادية وقد افترض - على سبيل المحاولة - أن الالكترون لا يشع أية طاقة على الرغم من أن هذا يتناقى مع السلوك الملحوظ للالكترونات المتذبذبة فى الهوائيات وفى أنظمة أخرى لا ذرية .

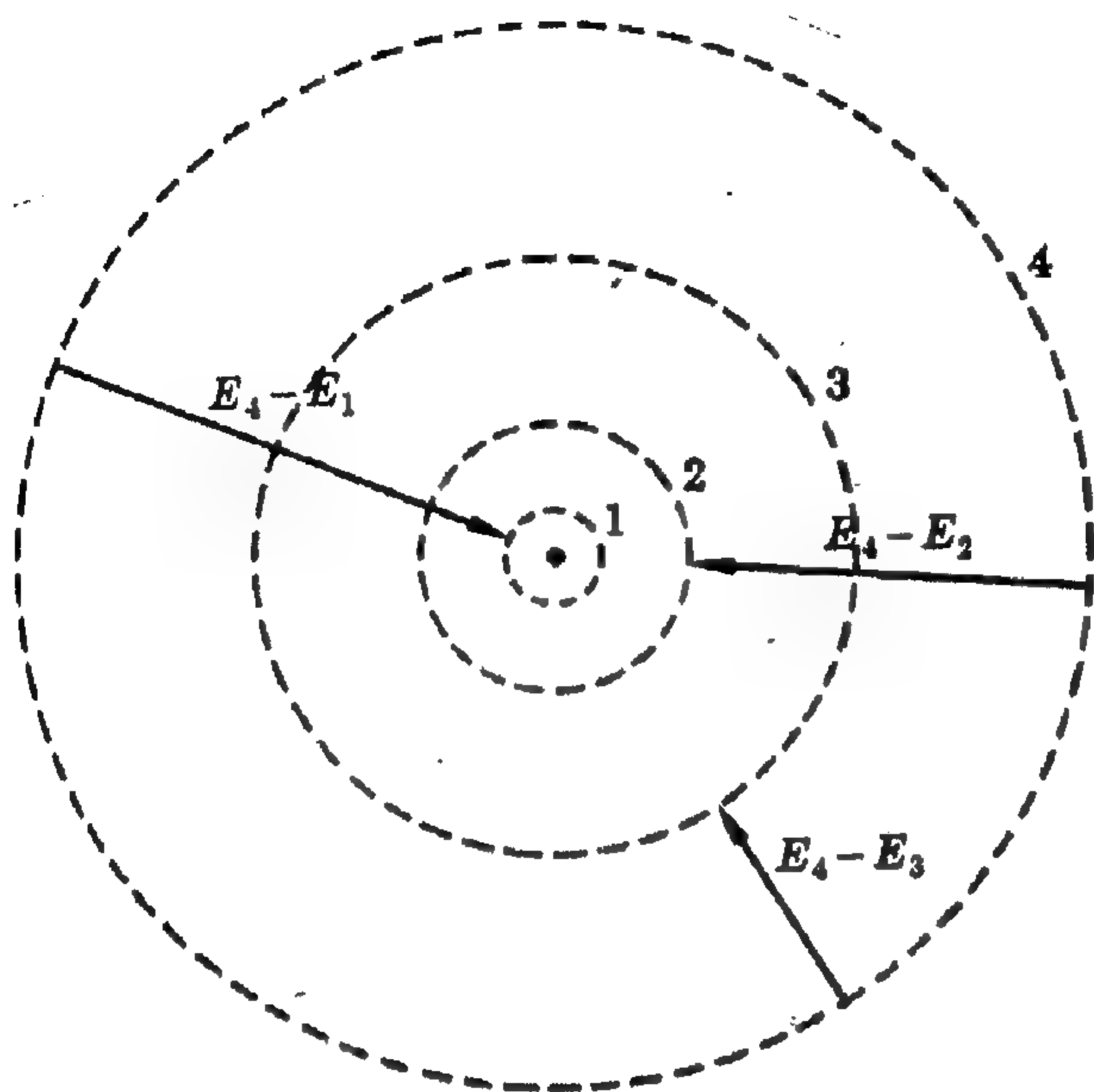
المدارات المستقرة المفترضة

دعنا نفترض - مع بوهر - بأن هناك مدارات خاصة يكون فيها الالكترون مستقرا أى أنه لا يشع أية طاقة . وتكون هذه المدارات شبيهة بما هو مبين فى الشكل ٢٧ - ٧ وإذا كان الالكترون فى المدار 2 فهو قد يهبط تحت ظروف معينة إلى المدار 1 . وحيث أن الالكترون مجذوب فى الواقع بواسطة النواة فهبوطه يكون « انحدارا » ويفقد بهذا طاقة وضع (ط.و) . عندما يهبط من المدار 2 إلى المدار 1 . إذا كانت الطاقة الكلية للالكترون فى المدار n هى E_n وفى المدار p هى E_p ، فإن الالكترون يفقد طاقة مقدارها $E_n - E_p$ حين يهبط من المدار n إلى المدار p

الانبعاث المفترض للفوتونات

وحيث أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث فإن الطاقة المفقودة $E_n - E_p$ يجب أن تكون قد ذهبت إلى مكان ما . وقد افترض بوهر أنها قد أشعت ككم منفرد من الطاقة الضوئية ، $h\nu$ ومن ثم فقد كتبت المعادلة التالية لطاقة الفوتون المبعث ،

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_n - E_p \quad (٢٧ - ٤)$$



شكل (٢٧ - ٧)
افترض بوهر مدارات دائرية
مستقرة معينة حول نواة
الذرة . والالكترون الموجود
في المدار 4 يستطيع مغادرة
المدار عن طريق أى من
الانتقالات الثلاثة المينة .

ولننظر الآن ما هي النتائج التي يمكن استخلاصها من المعادلتين (٢٧ - ٣) و (٢٧ - ٤) . لإيجاد E_n ، نلاحظ أن للالكترون (ط.ح) و (ط.و) وأن ط.ح له هي $\frac{1}{2}mv^2$ أو من المعادلة (٢٧ - ٣) يكون لدينا ،

$$\frac{Ze^2k}{2r} = \text{ط.ح}$$

حيث $k = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ ، وتكون (ط.و) للالكترون سالبة وذلك لأننا عرفنا (ط.و) على أنها صفر عند المالا نهاية وأنها تنخفض الى قيم أقل كلما اقترب الالكترون من النواة التي تجذبه . ويكون لدينا ،

$$\frac{-Ze^2k}{r} = \text{ط.و}$$

نجمع هذين الاسهامين معا ، نحصل على الطاقة الكلية ، أو

$$E = \frac{-Ze^2k}{2r} \quad (٢٧ - ٥)$$

لاحظ أن الطاقة تصبح أقل ، أى أكثر سالبة كلما صغرت قيمة r ، وهذا راجع إلى حقيقة أن (ط.و) يفقدها الالكترون عندما يهبط نحو النواة .
بالتعويض في المعادلة (٢٧ - ٤) نجد أن ،

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{Ze^2k}{2} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_n} \right)$$

$$٦ - ٢٧ \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{Ze^2k}{2hc} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_n} \right)$$

المعادلة (٦ - ٢٧) شبيهة جدا بالعلاقة التجريبية ، المعادلة (٢ - ٢٧) ، فكلتا المعادلتين تساوى مقلوب λ بالفرق بين حدين . وحيث أن أنصاف أقطار المدارات r_p و r_n مجهولة فإنه يصبح ممكنا أن نختارها بحيث تكون المعادلة (٦ - ٢٧) مطابقة تماما للمعادلة (٢ - ٢٧) . وفي ضوء نجاح بلانك وأينشتين في تصوير الطاقة على أنها كماتة أى تصدر في حزم صغيرة أو كمات ، فإن بوهر بحث عن كمية أخرى تعطى حين تكفى القيم الصحيحة لأنصاف أقطار المدارات . ووجد أن الاختيار الصحيح هو بالقول بأن عزم التحرك الزاوى للالكترون mvr يجب أن يكون مضاعفات صحيحة للمقدار $h/2\pi$ ، حيث h هو ثابت بلانك . ومن ثم كتب ،

كمية التحرك الزاوى كماتة

$$(٧ - ٢٧) \quad mvr_n = \frac{nh}{2\pi}$$

حيث n تساوى أى عدد صحيح و r_n هو نصف قطر المدار الذى رقمه n ويحل المعادلة (٧ - ٢٧) سعيا وراء v ثم التعويض عن قيمتها في المعادلة (٣ - ٢٧) ، توجد r_n كالتالى،

$$(٨ - ٢٧) \quad \frac{1}{r_n} = \left(\frac{4\pi^2 Ze^2mk}{h^2} \right) \left(\frac{1}{n^2} \right)$$

وبالتعويض عن هذا (وكذا بالتعبير المشتق بطريقة مماثلة للكمية r_p) في المعادلة (٦ - ٢٧) ، فإن ،

$$(٩ - ٢٧) \quad \frac{1}{\lambda} = \left(\frac{2\pi^2 Z^2 e^4 mk^2}{h^3 c} \right) \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

وحسب هذه المعادلة ، عندما يهبط الالكترون من المدار n إلى المدار p فإن ضوءا يتبعث ويكون طوله الموجى معطى بالمعادلة (٩ - ٢٧) . نلاحظ على الفور أن المعادلة (٩ - ٢٧) هى نفسها المعادلة (٢ - ٢٧) وهى المعادلة التجريبية . علاوة على ذلك ، إذا قدرت قيمة الثابت في المعادلة (٩ - ٢٧) لثبت أنها مساوية لثابت رايدبرج R في المعادلة (٢ - ٢٧) .

لقد اعتبر اشتقاق بوهر المعادلة (٢٧ - ٩) نجاحا جديرا بالملاحظة لأنها تنبأ بدقة واضحة بالأطوال الموجية المعروفة التي تبتعثها ذرات الأيدروجين . ولأول مرة يتمكن الفيزيائيون من اشتقاق صورة كمية لانبعاث الضوء من الذرات . وقد وضع بوهر وهو بصدد هذا الاشتقاق - فرضين خارجين على المؤلف بالإضافة إلى استخدام أفكار بلانك وأينشتين حول طاقة كم الضوء . فقد افترض أن هناك مدارات الكترونية مستقرة معينة يدور فيها الإلكترون دون أن يشع أية طاقة . كما افترض أن هذه المدارات كانت بحيث أن كمية التحرك الزاوي للإلكترون تساوى مضاعفات صحيحة للمقدار $h/2\pi$.

فإذا ما ووجه بوهر بالضغط حتى يبرر وضع هذين الفرضين ، فإن عليه أن يقول بأن التبرير الوحيد هو أنهما يعملان جيدا . فعلة صحتها لم تكن معروفة . ومع هذا ففى حين أن هذه الفروض تبدو متناقضة مع خبرتنا بالأشياء العادية ، إلا أن الذرة ليست شيئا عاديا . وليس لدينا سبب حقيقى أن نمتنع عن الاعتقاد بأن الإلكترونات فى الذرة تسلك كما افترض بوهر . والحقيقة القائمة أن فروضه أدت إلى نتائج صحيحة تجبرنا على استنتاج أن هذه الفروض ربما كانت صحيحة . وكما سنرى فيما بعد فى هذا الفصل ، فإن الاتجاه الحديث هو الأخذ بفروض بوهر بشكل عام ولكن مع استبدال أنماط فضائية أكثر تعقيدا بالصورة التفصيلية التي ذكرها للمدارات الالكترونية .

٢٧ - ٤ انبعاث الضوء من ذرة بوهر

رأينا فى الفصل السابق أنه حسب بوهر فإن الكترون الأيدروجين يستطيع الدوران فى أى واحد من المدارات المستقرة العديدة حول النواة ، وتعطى أنصاف أقطار هذه المدارات بالمعادلة (٢٧ - ٨) . وإذا قدرنا قيمة الثابت فى تلك العلاقة لوجدنا أن المدارات الالكترونية المستقرة (المسموح بها) فى الأيدروجين هى كالتالى :

$$\begin{aligned} n = 1: & \quad r_1 = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m} \\ n = 2: & \quad r_2 = (4)(0.53 \times 10^{-10}) \text{ m} \\ n = 3: & \quad r_3 = (9)(0.53 \times 10^{-10}) \text{ m} \end{aligned}$$

وهكذا . وهذه المدارات مصورة فى الشكل ٢٧ - ٧ . لاحظ أن النسبة بين أنصاف أقطار هذه المدارات هى كالنسبة $1^2 = 2^2 = 3^2 = 4^2$ الخ

لقد تعلمنا فى الميكانيكا والديناميكا الحرارية أن نظاما ما سيظل يفقد من طاقته حتى يصبح من المستحيل فقد المزيد من الطاقة . وهذا ما يفسر لماذا يتوقف البندول

في النهاية عن التراجع لماذا تسقط الكرة على الأرض . وبالمثل فان الالكترون في ذرة الأيدروجين سيفقد في نهاية الأمر أقصى ما يمكن ففقد من الطاقة وكما رأينا فالالكترون يفقد طاقة عندما يهبط بالقرب من النواة ، على أنه لا يستطيع الاقتراب أكثر من المدار 1 لأنه لا يوجد مدار أصغر يمكنه الهبوط اليه . ويقال عن الذرة التي هبط فيها الالكترون الى أدنى مستويات الطاقة أنها غير مستثارة وتكون الذرة مستقرة في حالة الطاقة هذه ولا تبعث أى ضوء كما أن طاقتها الكلية هي E_1 .

هناك قدر من الشغل اللازم لرفع (أو استثارة) الالكترون من أدنى حالات الطاقة (المدار) الى واحد من المدارات الأعلى أو مستويات الطاقة . والالكترون لا يستطيع الحركة الى المدار 2 أو أى مدار أعلى من تلقاء نفسه . على أن الذرة اذا قذفت بجسيمات أو ذرات أخرى فان التصادم مع الالكترون قد يعطيها ما يكفى من الطاقة حتى ترتفع الى مدار ذى طاقة أعلى .

افترض أن الالكترون قد أطيح به الى المدار 4 مثلا ، كما هو مبين في الشكل ٢٧ - ٧ . وعلى الرغم من أن الالكترون مستقر نسبيا في هذه الحالة الا أنه سيهبط الى حالة طاقة أدنى (أو مدار) خلال كسر صغير جدا من الثانية . وحين يفعل ذلك فإنه يفقد طاقة ويبعث كم من الضوء أو فوتون . فالالكترون يستطيع أن يهبط مباشرة ، مثلا ، من المدار 4 الى المدار 2 وحسب المعادلة ٢٧ - ٩ فان الطول الموجي للضوء المبعث نتيجة لهذا الانتقال هو ،

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right)$$

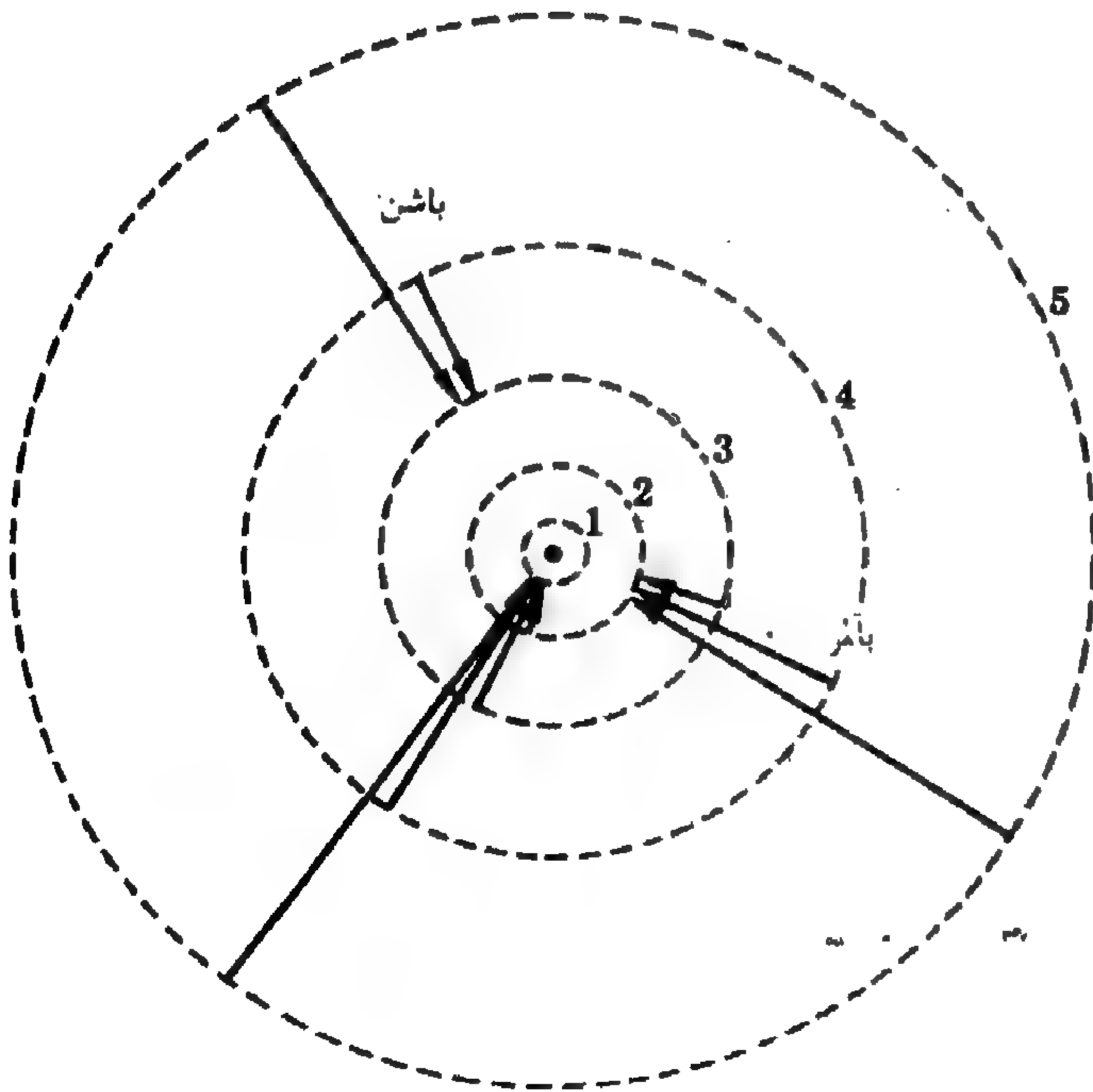
حيث استبدل بالمقدار الثابت قيمة المقاسة وهي ثابت رايدبرج . لاحظ أن هذا الطول الموجي . حسب المعادلة (٢٧ - ٢) هو الخط الثانى في متسلسلة بالمر . وبالمثل ، اذا هبط الالكترون مباشرة الى المدار 1 فان لطول الموجي يكون ،

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2} \right)$$

وهو الخط الثالث في متسلسلة ليمان . لاحظ أن الالكترون قد هبط هنا خلال فرق أكبر في الطاقة في هذه الحالة ، ولذا فالضوء المبعث سيكون ذا طاقة أعلى وطول موجي أقصر - هذا مناسب تماما حيث أننا نعرف أن متسلسلة ليمان تقع في الجزء فوق البنفسجي القصي من الطيف بينما تقع متسلسلة بالمر في الجزء المرئي من الطيف .

من الطبيعي أن الإلكترون قد يهبط أيضا من الحالة 4 الى الحالة 3 مما يشكل خطا في متسلسلة باشن . نلاحظ أنه لو هبط الكترون من مدار خارجي الى المدار الأول لابتعث خط في متسلسلة ليمان . أما اذا هبط الى حالة الطاقة 2 لا بتعث طول موجي في متسلسلة بالمر أما الانتقال الى المستوى 3 فينتج عنه خط في متسلسلة باشن وهذا كله موضح في الشكل ٢٧ - ٨ .

أصل حد المتسلسلة . يبتعث خط حد المتسلسلة عندما يهبط الإلكترون من خارج الذرة الى أدنى حالة طاقة لهذه المتسلسلة المعينة . فحين يهبط الإلكترون من المدار 3 الى 2 ، يبتعث أول خط في متسلسلة بالمر واذا هبط من 4 الى 2 ينتج الخط الثاني لمتسلسلة بالمر . وفي الواقع يتضاءل فرق الطاقة بين المستويات بسرعة كلما ذهبنا الى المدارات العليا ومن ثم فان مقدار الطاقة المبتعثة حين يهبط الإلكترون من المدار 10 الى المدار 2 هو بالتقريب ما يبتعث حين يهبط من المدار 100 الى 2 . ويعنى هذا أن خطوط متسلسلة بالمر تصبح متلاصقة جدا كلما إقترنا من الأطوال الموجية المبتعثة بانتقالات من المدارات الخارجية الى المدار 2 ومن الطبيعي أن أكبر طاقة تبتعث اذا هبط الإلكترون من خارج الذرة $(n \rightarrow \infty)$ الى المدار 2 . وهذا هو ما يؤدي الى ابتعاث الطول الموجي لحد المتسلسلة



شكل (٢٧ - ٨)
يهبط الإلكترون دائما الى
نفس المدار الداخلى في حالة
متسلسلة طيفية منفردة

٢٧ - ٥ الرسوم البيانية لمستويات الطاقة

من المناسب دائما أن يحرص الانسان اهتمامه في طاقات الالكترون (والذرة) دون أن يلقي بالآلا الى هندسة المدارات ، الخ . فالإنسان يهتم في الواقع ، بالطاقات فقط نظرا لأنها هي وحدها التي تؤثر على الأطوال الموجية للضوء المبعث من الذرة . ولذا فاننا نستخدم رسما بيانيا لمستويات الطاقة لذرة ما (ولنظم أخرى كثيرة كذلك) . ولننظر الآن كيف يكون هذا الرسم البياني لذرة الأيدروجين .

لقد رأينا في المعادلة (٢٧ - ٥) أن الطاقة الاجمالية لذرة الأيدروجين ، عندما يكون الالكترون في المدار n هي ،

$$-E_n = \frac{Ze^2k}{2r_n} \quad (٢٧ - ٥)$$

ولكن $1/r_n$ يمكن إيجادها من المعادلة (٢٧ - ٨) وحين يعوض بها في المعادلة (٢٧ - ٥) نجد ،

$$E_n = - \left(\frac{2\pi^2k^2e^4Z^2m}{h^2} \right) \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad (٢٧ - ١٠)$$

عند تقدير قيمة الثابت (وتذكر أن $Z = 1$ لأن شحنة نواة الأيدروجين $+1e$) فاننا نجد الطاقة بالالكترون فولت ،

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \quad (٢٧ - ١١)$$

طاقات ذرة بومر

يتضح من هذه المعادلة أن طاقة الذرة تكون صفرا عندما $n \rightarrow \infty$ ولاشك أنك ستتذكر أن هذه هي نتيجة الطريقة التي عرفنا بها صفرا طاقة الوضع ، تكون ط.و. صفرا عندما يكون الالكترون والنواة على مسافة لا نهائية من بعضهما البعض وعندما $n \rightarrow \infty$ فإن $r_n \rightarrow \infty$ وبالإضافة الى هذا ، عندما $n = 1$ ويكون الالكترون في أول مدار له ، فإن $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ هذا ما نسميه الحالة الأرضية للذرة . وبالمثل عندما $n = 2$ يكون الالكترون في المدار الثاني $E_2 = -3.4 \text{ eV}$ وهكذا . ويوضح الشكل ٢٧ - ٩ أ الرسم البياني لمستويات الطاقة الذي يصور هذه الطاقات لذرة الأيدروجين وهو ببساطة عبارة عن مجموعة من الخطوط الأفقية رسمت بحيث تبين الطاقات المختلفة التي يمكن للذرة أن تتخذها .

أما الجزء (ب) من الشكل فيبين كيفية تمثيل خطوط الطيف المختلفة - والتي تبعث بها ذرة الأيدروجين - على مثل هذا الرسم البياني . ويكون طول سهم الانتقال على هذا النوع من الرسوم البيانية مقياسا مباشرا للطاقة المتضمنة . وعلى هذا فأسهم

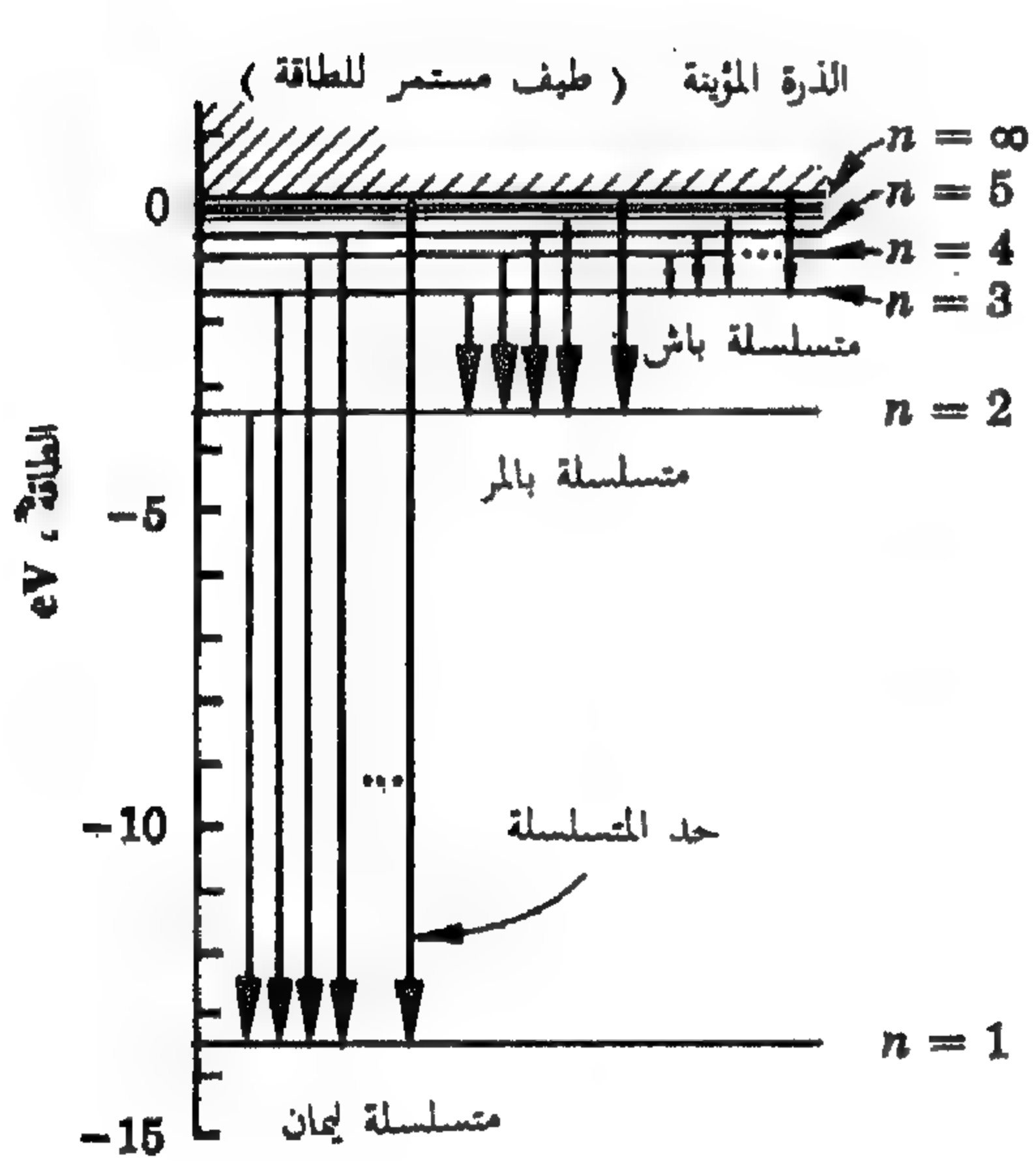
متسلسلة ليمان ستكون أقصر . ومن السهل أيضا الاستنتاج من هذا الرسم أن خطوط الطيف في متسلسلة يتم فيها الانتقال من قيم كبيرة n ستقع متقاربة جدا مع بعضها البعض وذلك لأن مستويات الطاقة تلك لها تقريبا نفس قيمة الطاقة .

مثال توضيحي ٢٧ - ١ الهليوم وحيد التأين هو ذرة هليوم فقدت واحدا من الكتروناتها الاثنين . ارسم رسما بيانيا لمستويات الطاقة لهذا الأيون .

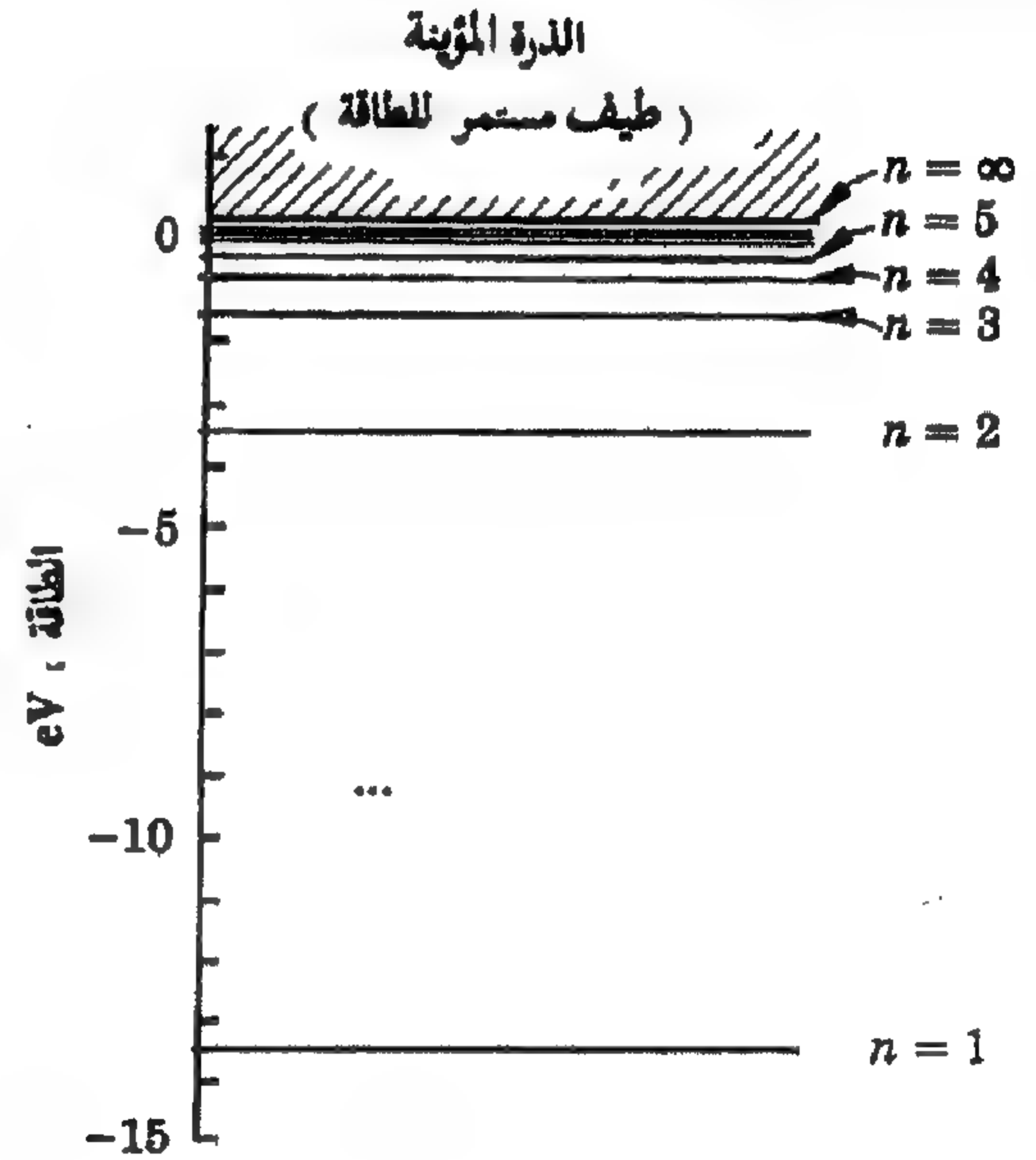
طريقة الحل . يشبه الهليوم وحيد التأين كثيرا ذرة ايدروجين باستثناء شحنة النواة التي تبلغ $+2e$ أي أن $Z = 2$. من المعادلتين (٢٧ - ١٠) و (٢٧ - ١١) بوضع $Z = 2$

$$E_n = -\frac{54.4}{n^2} \text{ eV}$$

شكل (٢٧ - ٩)
(أ) الرسم البياني لمستويات
الطاقة في الأيدروجين . (ب)
أصل المتسلسلات الطيفية .



(ب)



(a)

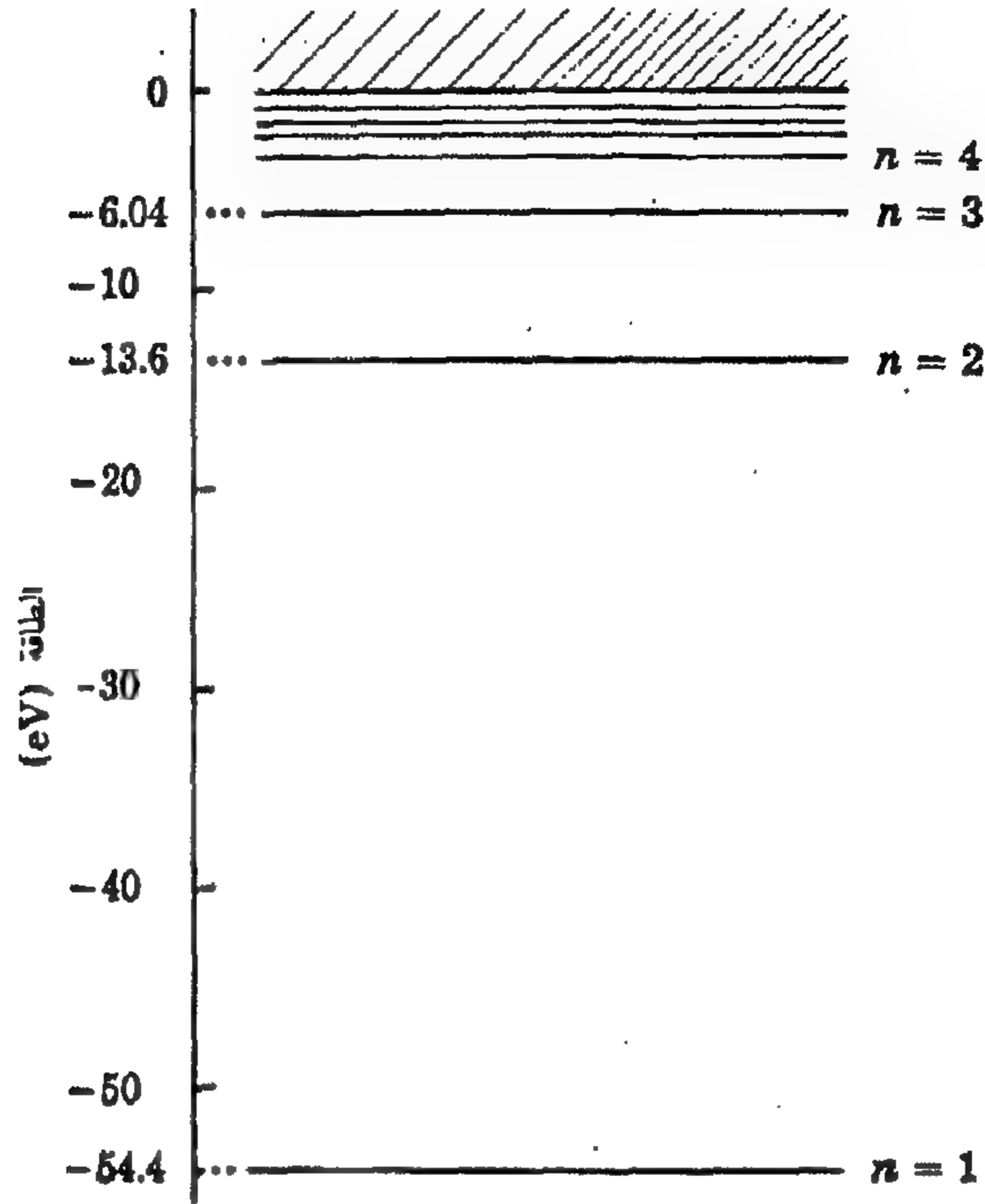
وهذا يقود الى $E_3 = -6.04 \text{ eV}$ ، $E_2 = -13.6 \text{ eV}$ ، $E_1 = -54.4 \text{ eV}$ الخ . ويوضح الشكل ٢٧ - ١٠ الرسم البياني لهذه القيم .

مثال توضيحي ٢٧ - ٢ أوجد الطول الموجي لأول خط من المتسلسلة التي تكافئ متسلسلة ليمان في هليوم وحيد التأين .

طريقة الحل تناظر متسلسلة ليمان هيوط الكترون من المستويات العالية الى المستوى $n=1$ وفي الحالة الراهنة نهم بالخط الأول لهذه المتسلسلة أي أننا نحتاج الى الانتقال من $n=2$ الى $n=1$. من المثال السابق (أو من الشكل ٢٧ - ١٠) نعرف أن $E_1 = -54.4 \text{ eV}$ وأن $E_2 = -13.6 \text{ eV}$ ولذا تكون طاقة الفوتون المبعث هي

408 eV = 54.4 - 13.6 وهذا المقدار يكافئ $65 \times 10^{-19} \text{ J}$. ولما كانت طاقة الفوتون هي $h\nu$ أو $h(c/\lambda)$ فان ،

$$\lambda \approx \frac{hc}{65 \times 10^{-19} \text{ J}} = 30.0 \text{ nm}$$



شكل (٢٧ - ١٠)
الرسم البياني لمستويات
الطاقة لهليوم وحيد التأين .

وقد كان من الممكن اجراء هذه الحسابات بطريقة أسهل لو أننا عرفنا أن 1 eV تناظر $\lambda = 1240 \text{ nm}$ وحيث أن λ تتغير عكسيا مع الطاقة لذا فالطول الموجي يمكن ايجاده من علاقة تناسب الآتية :

$$\frac{\lambda}{1240 \text{ nm}} = \frac{1 \text{ eV}}{40.8 \text{ eV}}$$

ومنها

$$\lambda \approx 30.0 \text{ nm}$$

وقد ثبت من هذا التحويل أن ، 1 eV يناظر 1240 nm ملائما في حسابات من هذا القبيل .

٢٧ - ٦ امتصاص ذرة بوهر للضوء

لا تصدر ذرات الأيدروجين غير المثارة أى ضوء وذلك لأن الإلكترون يكون فى أدنى مستوى للطاقة فى المدار 1 ، أى أن الذرة فى الحالة

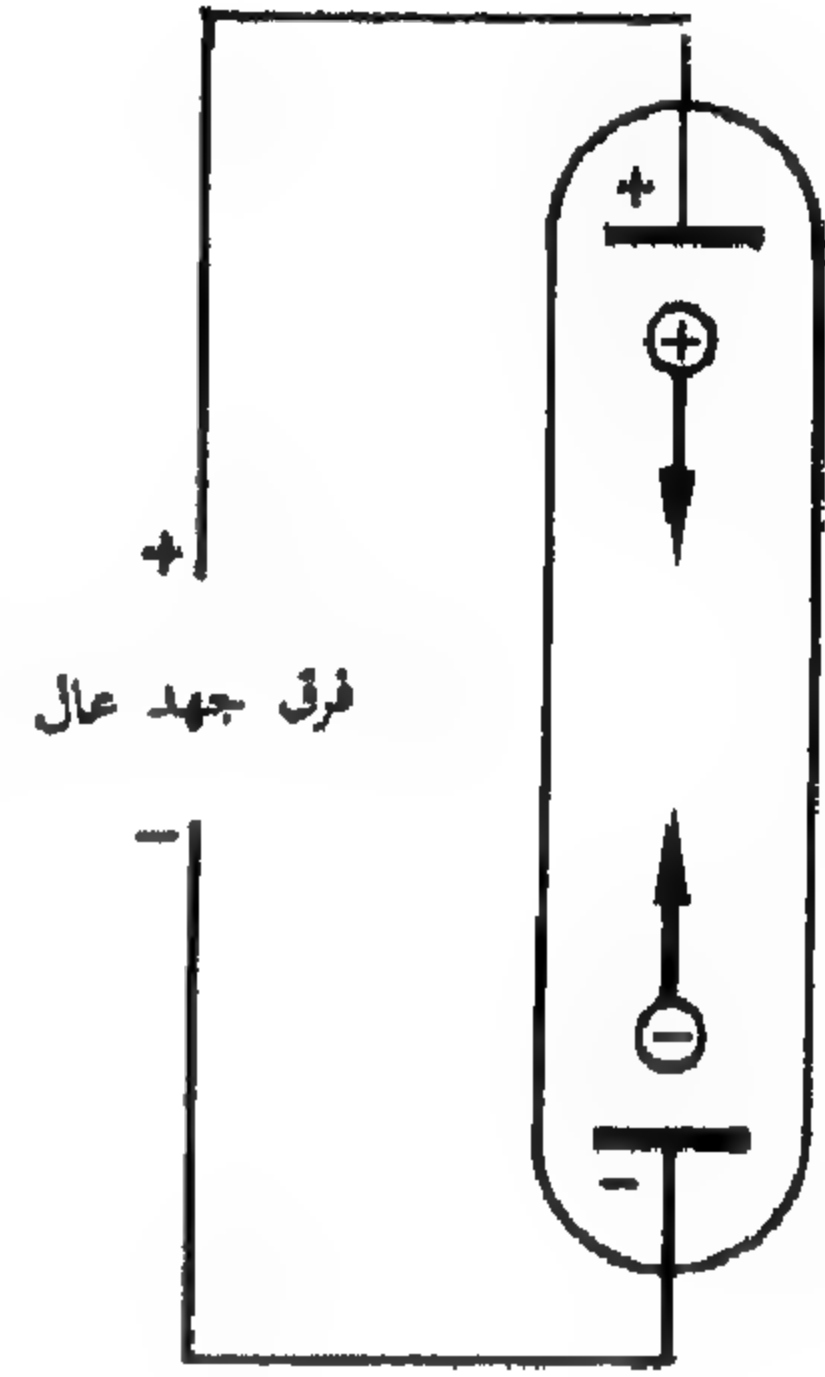
الأرضية . وكما أشرنا سابقا تبعث الذرة ضوءا فقط اذا استثيرت بشكل ما الى واحد من مستويات الطاقة العليا لها وعندئذ يستطيع الإلكترون أن يهبط عائدا نحو النواة فينبعث الضوء خلال هذه العملية .

هناك العديد من الطرق التى يمكن بها استثارة الإلكترونات الى مستويات أعلى للطاقة : فعند درجات الحرارة المرتفعة يكون لدى الذرات ط. ح من الكبر بحيث أنها عندما تتصادم مع بعضها البعض تستثار الإلكترونات الى مستويات الطاقة الأعلى لها . والغازات الساخنة جدا تقوم باصدار الضوء لأن ذراتها تكون مستثارة بهذه الطريقة .

ومن ناحية أخرى لو أن ذرات غاز ما وضعت فى أنبوبة تفريغ فان الإلكترونات يمكن أن تستثار الى المستويات الأعلى عن طريق التصادم مع الأيونات السريعة أو الإلكترونات الأخرى . والجهد المرتفع بين القطبين المبيينين فى الشكل ٢٧ - ١١ يقوم بتعجيل عدد صغير من الأيونات والإلكترونات الحرة التى تكونت من الذرات المتعادلة نتيجة قذفها بالأشعة الكونية المتناثرة أو الأشعاع النووى التى تنفذ خلال الزجاج . ولو كان فرق الجهد مرتفع بشكل كاف فان الشحنات المعجلة ستصطدم مع ذرات أخرى وتؤينها ، أى تنتزع منها الكترونات وتحررها . وسرعان ما يتكون عدد هائل من الجسيمات المشحونة ذات السرعات العالية ويحدث التفريغ الكهربائى، وعندما تتحد الإلكترونات بالأيونات فان ضوءا ينطلق . وهناك مستويات أخرى للاستثارة تحدث مثل التأين . وهذه أيضا تطلق ضوءا حينما تهبط الإلكترونات الى مستويات أدنى للطاقة . وابتعث الضوء بواسطة الذرات فى أنبوبة تفريغ غازية هو مصدر للضوء فى لافتات النيون والنيبيلات المماثلة .

تستثار الذرات أيضا حين يسطع عليها ضوء قوى . فشعاع الضوء يمكن النظر اليه باعتباره مكونا من فوتونات طاقتها $h\nu$ ، ولو اصطدم أحد الفوتونات مع ذرة ما فقد يمنح طاقة للإلكترون ويستثيره الى مدار أعلى ، وباستثناء بعض الحالات النادرة، مثل ظاهرة كومبتون، فان الفوتون يجب أن يفقد أما كل طاقة أو لا يفقد شيئا على الإطلاق ، ومن ثم فان الفوتون سيعطى كل طاقة الى الإلكترون فى ذرة ما فقط عندما تكون طاقة الفوتون $h\nu$ مساوية تماما للفرق فى الطاقة بين المستوى الأسمى ومستوى آخر أعلى .

ولهذا تستثار ذرات الأيدروجين (وكذا الغازات الأخرى) بأطوال موجية محددة من الضوء . ولما كانت معظم الإلكترونات فى أدنى مستويات الطاقة وهى الحالة الأرضية بالنسبة للذرة فان الإلكترون سيكتسب - على الأقل طاقة مقدارها $E_2 - E_1$ عندما تستثار . وهذا القدر بالضبط من الطاقة هو اللازم لرفع الإلكترونات من المستوى 1



شكل (٢٧ - ١١)
يقوم فرق الجهد المرتفع عبر الأنبوبة بتعجيل الإلكترونات والأيونات ولو كان فرق الجهد كبيرا بدرجة كافية فان الشحنات المتحركة ستؤين ذرات أخرى بالتصادم معها .

الى المستوى 2 (أنظر الشكل ٢٧ - ٩) أما طاقات الفوتون الأقل من هذه فلن تكفى لرفع الإلكترون الى المستوى 2 ومن ثم لا يمكن أن تمتص .

ولو كانت طاقة الفوتون أكبر قليلا من $E_2 - E_1$ فإن الفوتون أيضا لا يمتص لأن الإلكترون وقتها سيرتفع الى مستوى لا وجود له للطاقة ، أى الى مستوى غير تلك التى وجد بوهر أنها مسموح بها . وطاقة الفوتون التالية فى الارتفاع لهذه والقادرة على استثارة الذرة هي $E_3 - E_1$ ، ومثل هذا الفوتون يستطيع رفع الإلكترون الى المستوى 3 . وبالمثل تستطيع طاقات الفوتونات $E_4 - E_1$ ، $E_5 - E_1$ ، وهكذا ، أن تستثير الإلكترونات ، وهذه الفوتونات (أو ما يكافئها من الأطوال الموجية للضوء) ستمتص بشدة من قبل ذرات الأيدروجين ولن تمتص فوتونات غيرها .

أما الفوتون الذى طلقته $E_\infty - E_1$ فسينتزع الإلكترون تماما من الذرة ويطلقه أى أن هذا الطول الموجى للأشعاع سيؤين الذرة . ويسمى هذا الفرق فى الطاقة طاقة التأين للذرة . ويجب أن تكون طاقة الفوتونات أو الإلكترونات أو أية جسيمات أخرى مقذوفة نحو الذرة بحيث تساوى $E_\infty - E_1$ أو أكبر حتى تؤين الذرة . نلاحظ من الشكل ٢٧ - ٩ أن هذه الطاقة تبلغ 13.6 eV للأيدروجين . اذا تلقت الذرة قدرا من الطاقة أكبر من هذا فإن الإلكترون يصير حرا وستكون له طاقة اضافية أيضا . وتظهر هذه الطاقة على شكل ط.ح. للإلكترون المحرر . وهذه الطاقة ليست مكماه ولذا تمثل بالتسلسل المتصل لقيم $E > 0$ فى الشكل ٢٧ - ٩ .

هناك علاقة دقيقة بين الأطوال الموجية للضوء الذى تمتصه ذرة ما وتلك التى تبعثها . فذرات الأيدروجين غير المستثارة مثلا ، لا يمكنها امتصاص فوتونات طاقتها أقل من $E_2 - E_1$ مع أن فوتونا له هذه الطاقة بالضبط سيتمتص بشدة لأنه صحيح تماما لكى يرفع الإلكترون الى المستوى 2 . وفى الحقيقة يؤدى هذا الانتقال الى خط له أطول طول موجى فى متسلسلة ليمان كما رأينا من قبل . ومن الواضح أن الطول الموجى لأول خط فى متسلسلة ليمان لا يبعث فحسب من ذرة مستثارة ولكنه قد يمتص بواسطة ذرة غير مستثارة . وبالمثل فإن كل الأطوال الموجية الأخرى التى بينا أنها سيتمتص بشدة هى أيضا أعضاء فى متسلسلة ليمان . وكما قد يتوقع من هذه المناقشة فإن الذرات المستثارة تبعث أطوالا موجية من الضوء الذى يمتص بشدة من قبل الذرات غير المستثارة .

مثال توضيحي ٢٧ - ٣ ما هو أطول طول موجى للضوء قادر على تأيين ذرة ايدروجين ؟

طريقة الحل يجب أن تكون طاقة الطول الموجى المطلوب كافية لانتزاع الإلكترون من الذرة وتحريره أى لرفع الإلكترون الى مستوى الطاقة $\infty \rightarrow n$. ونفس هذه الطاقة

تبعث حينما يهبط الإلكترون من المدار ∞ الى المدار 1 . من الواضح ان الطول الموجي سيعطى بالمعادلة (٢٧ - ٩) بوضع $p=1$ و $n = \infty$ والثابت $R = 1.097 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$

$$\frac{1}{\lambda} = (1.097 \times 10^3) \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{\infty} \right) \text{ m}^{-1}$$

أو

$$\lambda = 0.912 \times 10^{-7} \text{ m} = 91.2 \text{ nm}$$

وهذا بالطبع هو أيضا حد المتسلسلة ، لمتسلسلة ليمان

وقد كان ممكنا الحصول على هذه الاجابة بطريقة أسرع لو أننا لاحظنا أن $E_{\infty} - E_1 = 13.6 \text{ eV}$ وذلك من الشكل ٢٧ - ٩ أو من المعادلة (٢٧ - ١١) ، ثم باستخدام التناسب المذكور في المثال التوضيحي ٢٧ - ٢ نجد أن ،

$$\frac{\lambda}{1240 \text{ nm}} = \frac{1 \text{ eV}}{13.6 \text{ eV}}$$

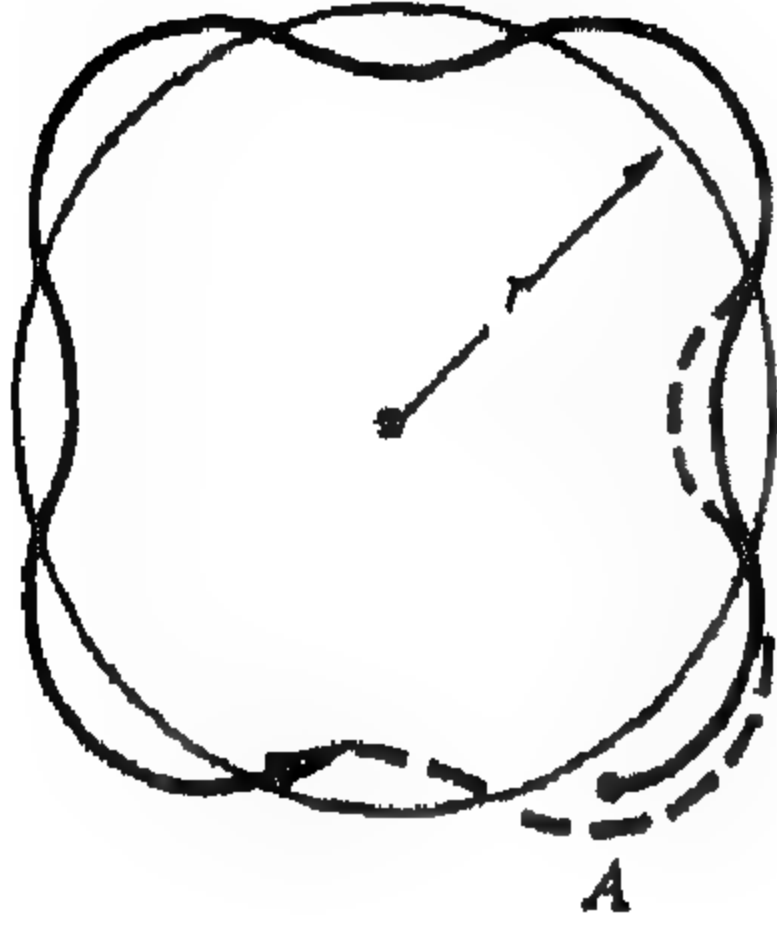
ومنها نجد أن $\lambda = 91.2 \text{ nm}$

٢٧ - ٧ تفسير دي برولي لمدارات بوهر

لقد نجحت نظرية بوهر لذرة الأيدروجين نجاحا كبيرا - كما رأينا - في قدرتها على وصف سلوك الذرة ، وحيث أن الهليوم وحيد التأين والليثيوم ($Z=3$) ثنائى التأين كانت فضلا عن ذلك متوافقة مع نموذج بوهر فلا عجب أن نجدها هي الأخرى على صلة قوية بالتنبؤات التى وصلت اليها النظرية ، بالإضافة الى ذلك سنرى أن نموذج بوهر يفيد في تنسيق الملاحظات الخاصة بذرات أكثر تعقيدا . وعلى الرغم من هذا النجاح فان نموذج بوهر ظل يعانى من نقص خطير في كثير من النواحي ، وأحدى نقط الضعف الخطيرة تتعلق بفرض بوهر الخاص بالمدارات . ولنحاول الآن أن نرى كيف يؤدي مفهوم دي برولي عن الطبيعة الموجية للجسيمات الى صورة أكثر اقناعا للذرة .

نذكر أن جسيما كتلته m وسرعة v يتميز بطول موجي حسب دي برولي $\lambda = h/mv$. ولقد بدا لدى برولي أن ظاهرة التكمية المحيرة والتي اكتشفها بلانك وتلاه بوهر لها مثيل من خبرتنا الشائعة . ففي حالة اهتزاز الاوتار والانابيب الخ ، تكون الاهتزازات مكماه بمعنى أن الرنين يحدث عند ترددات خاصة فقط . وهذه

مدارات بوهر باعتبارها رنين
الالكترون - موجة



شكل (٢٧ - ١٢)

لو كان طول المدار $2\pi r$ عبارة
عن عدد صحيح من
الأطوال الموجية فإن الموجة
سوف تقوى لنفسها كلما
عادت الى نقطة البداية A .
وفي الحالة الموضحة
 $2\pi r = 4\lambda$

الترددات هي دائما تلك التي تكون فيها الموجات المعنية « مناسبة » تماما للوتر أو داخل الأنبوبة أو أى شيء آخر وبهذه الحقيقة في ذهنه فكردى برولى في مدارات بوهر كما لو كانت مسارات رنين لموجات الالكترون .

لكي ترن موجة ما على مسار دائرى فان هذا المسار يجب أن يكون طوله مساويا لطول موجى واحد بالضبط أو طولان موجيان أو ثلاثة الخ . وفي تلك الحالات فقط ستظهر قمم الموجة عند نفس الأماكن على المسار بحيث يتم الرنين حين تكون قمة فوق قمة وقاع فوق قاع كما هو ممثل في الشكل ٢٧ - ١٢ حيث كان المسار مساويا في الطول لأربعة أطوال موجية . وبشكل عام فانه لو كان طول المسار مساويا لعدد n طول موجى فانه ،

$$2\pi r_n = n\lambda$$

أحيث أن $\lambda = h/mv$

$$2\pi r_n = n \frac{h}{mv}$$

ولكن هذا يمكن كتابته كما يلي ،

$$mvr_n = n \frac{h}{2\pi}$$

وهذا بالضبط هو فرض بوهر في المعادلة (٢٧ - ٧)

من هنا نجد أذن أن مدارات بوهر يمكن اعتبارها رنين الموجات الالكترونية وهي تحيط بالنواة . وبهذه الطريقة لا يمكن للمدارات أن تكون نتيجة افتراض لغرض معين ولكن يمكن تتبع أصلها الى حقيقة أساسية وهي أن الجسيمات لها خواص موجية . وعلى الرغم من أن نظرية بوهر قد صارت أكثر معقولة نتيجة للتفسير الأخير للمدارات الا أننا سنرى في القسم التالى أن نظرية بوهر قد صارت مفرطة في التبسيط بشكل فادح .

٢٧ - ٨ رنين الموجات في الذرات

قبل أن نستمر في مناقشة دور موجات دى برولى في ذرة ما لنفحص أولا معنى موجة دى برولى نفسها . فلعدة سنوات كان هناك قدر كبير من الجدل حول حقيقة ما نخبرنا به الخواص الموجية للجسيمات وقد أصبح من المقبول بشكل عام أن موجات دى برولى مرتبطة بالجسيمات المادية ارتباطا الأمواج الكهرمغناطيسية بالفوتونات .

فعندما يرسل شعاع من الضوء مثلاً ، الى شقين ، تلاحظ نمط التداخل على ساتر وراء الشقين وفي الواقع يلاحظ هذه الظاهرة لجميع أنواع الموجات كما رأينا . ولقد كانت قناعتنا في الفصول الماضية محصورة في حساب مواقع النهايات العظمى والنهايات الدنيا في نمط التداخل ولكن الفوتونات تسقط في جميع المواقع التي يلاحظ فيها ضوء ، فعدد الفوتونات الساقطة على نقطة معينة يتناسب طردياً مع شدة الضوء في تلك النقطة . ومن ثم يمكن اعتبار نمط شدة الاضاءة على أنه رسم بياني يوضح نسبة الفوتونات في الشعاع القادم الذي يسقط على الساتر في مواقع مختلفة .

لكي نحسب شدة الاضاءة لنمط متكامل فان علينا أن نحل مسألة رياضية معقدة باستخدام المعادلة الموجية . ويؤدي حل هذه المعادلة الى ايجاد كمية يطلق عليها الدالة الموجية وهي تمثل بالرمز ψ (وهو حرف أغريقى ينطق « بساي ») وهي كمية تعطى حين تربع شدة الضوء التي يجب أن نجد لها عند أية نقطة في الفضاء ولكن حيث أن شدة الضوء تتناسب مع عدد الفوتونات ، فان الدالة الموجية تخبرنا أيضاً عن كم من الفوتونات سيوجد عند كل نقطة في الفضاء . تلخيصاً للموقف ، فان حل المعادلة الموجية لموجات الضوء المارة خلال شق مزدوج أو نبيطة مشابهة ، يؤدي الى ايجاد الدالة الموجية ψ للموجات الضوئية . وهذه الدالة الموجية تعطى شدة الاضاءة في كل نقطة من نقط نمط التداخل وهذه بدورها تخبرنا عن عدد الفوتونات الموجودة في كل جزء من النمط .

وينطبق موقف مشابه على موجات دي برولي فالمعادلة التي تحكم سلوكها هي معادلة شرودنجر التي ذكرت بالفعل في القسم ٢٦ - ٧ . ويمكن حل معادلة شرودنجر مثلما حدث للمعادلة الموجية ، فنصل الى الدالة الموجية ψ ، التي حين تربع تعطى شدة موجات دي برولي وكما سبق تخبرنا الشدة عن توزيع الجسيمات في الفضاء . وفي حين أن شدة الضوء ودالته الموجية تصف حركة الفوتونات ، فان الدالة الموجية لمعادلة شرودنجر تصف حركة الالكترونات (أو جسيمات أخرى)

ولكى ندرك ما معنى هذا في موقف فعلي علينا أن نعتبر ذرة الايدروجين . وعلى أحسن الوجوه يمكن لنظرية بوهر أن تخبرنا فقط عن موقع النهايات العظمى في نمط التداخل . وكما في حالة الشق المزدوج أو أية تجربة تداخل أخرى لا يشكل هذا الا جزءاً صغيراً من الموضوع ، لأن الفوتونات (للضوء) أو الالكترونات (لموجات دي برولي) تتواجد في أماكن أخرى أيضاً . وحين تحل معادلة شرودنجر لذرة الايدروجين (وهذا ليس عملاً روتينياً بسيطاً) فان شدة النمط ستكون معتمدة

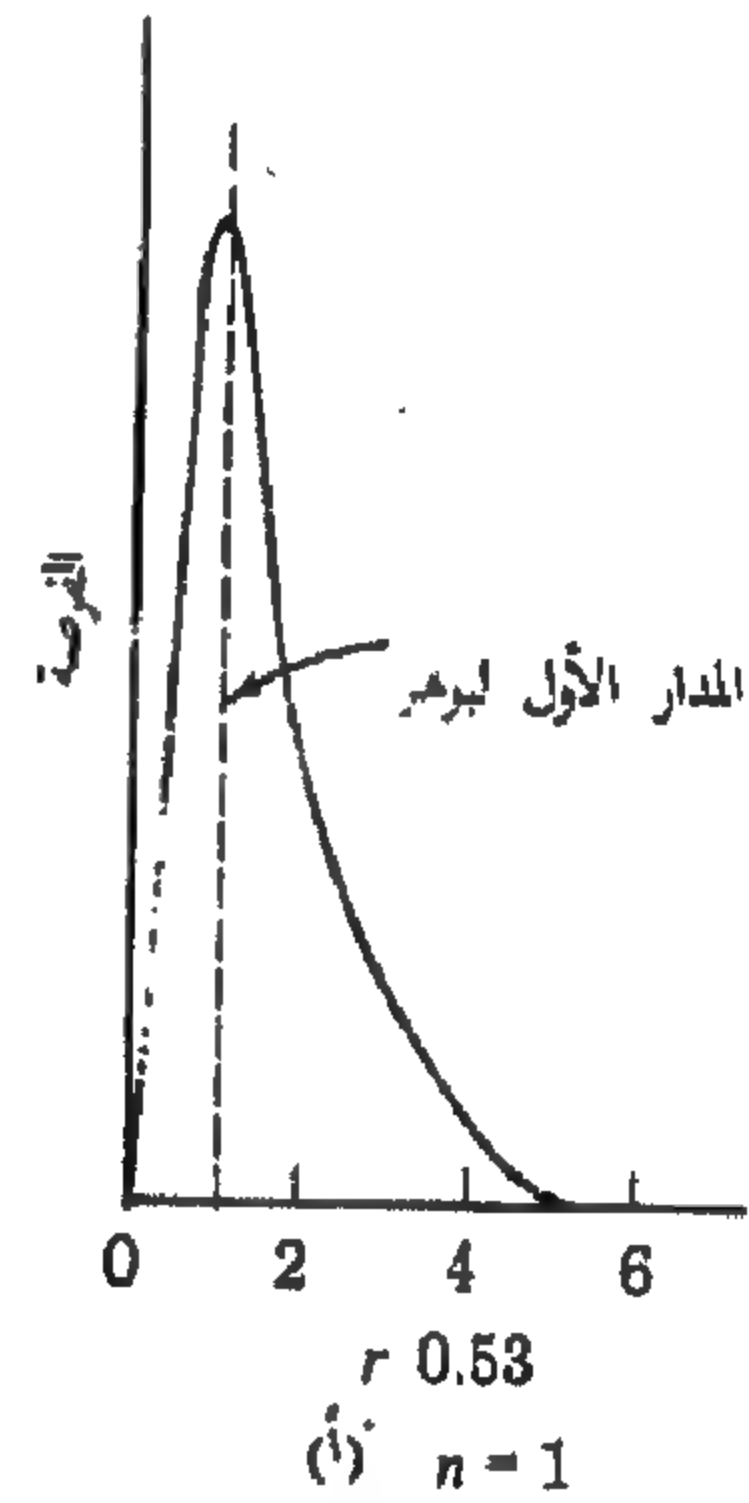
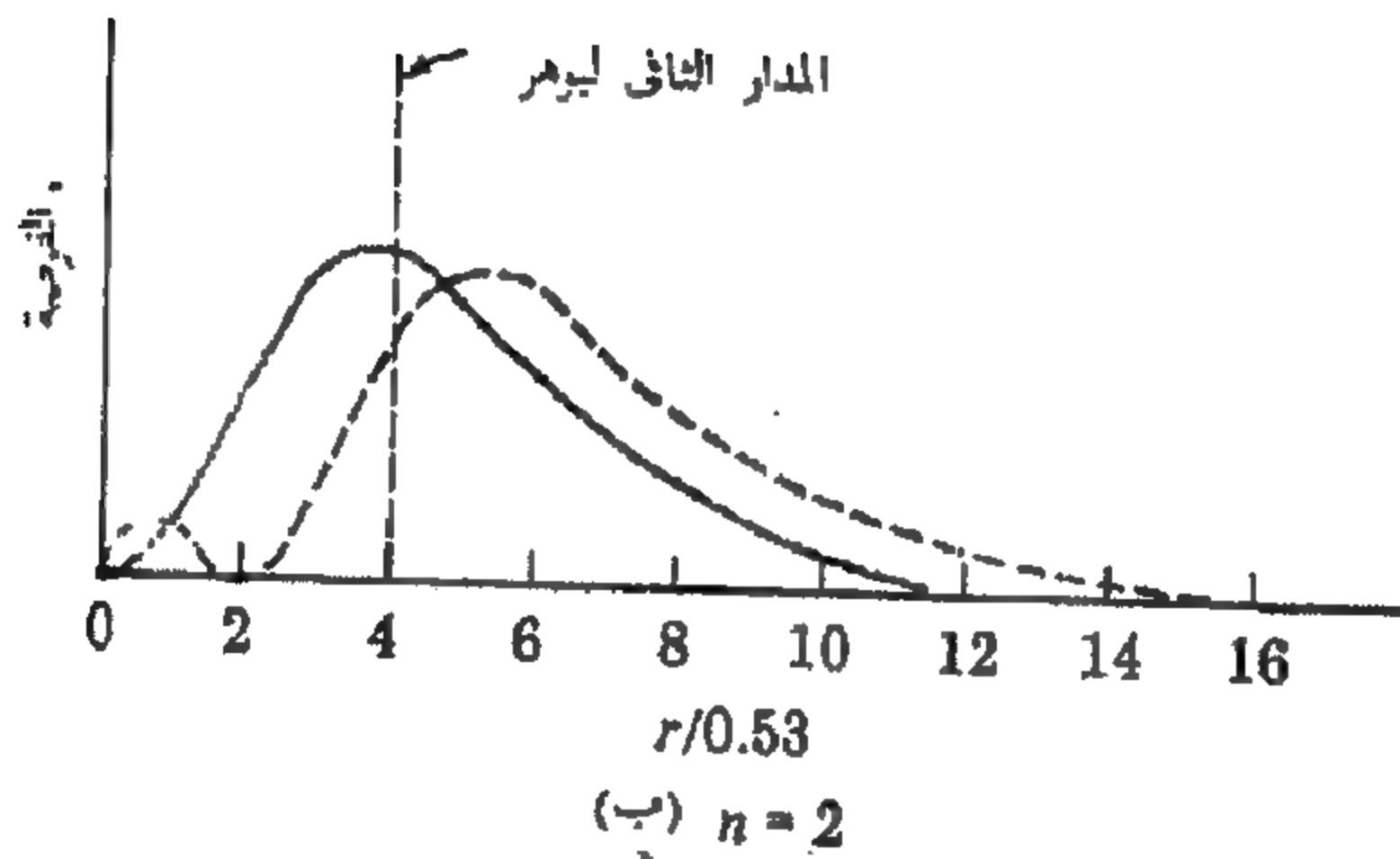
على مجرد كيفية رنين موجة الإلكترون بداخل الذرة، ولوصف هذا الرنين يجب أن نستفيد من مجموعة من الأرقام الصحيحة تسمى الأعداد الكمية .

يتطابق العدد المسبى بالعدد الكمي الرئيسي n مع العدد n الذي استخدم في نظرية بوهر ، وهو يدلنا على طاقة الذرة ، ففي كل من نظرية بوهر والنظرية الموجية للذرة تعطى الطاقة بالمعادلة ،

$$E_n = -\frac{13.6Z^2}{n^2} \text{ eV}$$

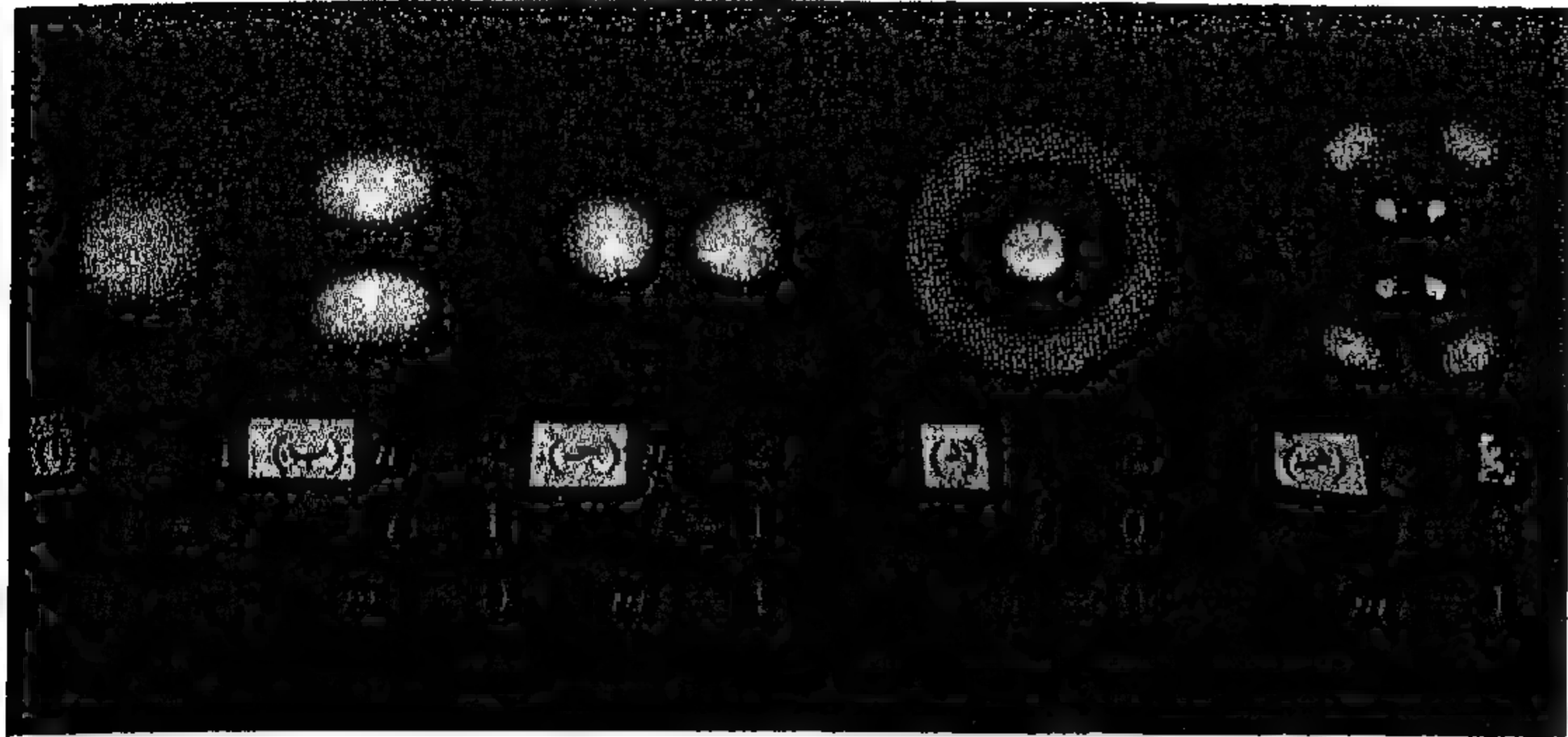
شكل ٢٧ - ١٣
(أ) تتبأ النظرية الموجية بالإحتمالات الميئة والدالة على وجود الإلكترون عند أنصاف أقطار مستعدة (تقاس r بالأنجستروم)
(ب) منحنيان مختلفان للرنين للعدد $n = 2$.

لقد أفترض بوهر أنه عندما $n = 1$ فإن الإلكترون يكون في أول مدار له وهو دائرة . على أن الحل الموجي يعطينا نمط الشدة بأكمله ويخبرنا بأن من المحتمل أن نجد الإلكترون في أماكن عديدة مختلفة ولكن أكبر الاحتمالات أن يوجد في تلك المناطق حيث تكون ψ الدالة الموجية كبيرة . وهذا النمط للشدة المناظر للحالة $n = 1$ لذرة الأيدروجين موضح في الشكل ٢٧ - ١٣ أ حيث بينا الفرصة (أو الاحتمال) أن يوجد الإلكترون عند أنصاف أقطار معينة من النواة . تنص نظرية بوهر ، بالطبع على أن الإلكترون سيوجد فقط عند نصف قطر مدار بوهر الأول وهو 0.53 \AA .



وكما هو متوقع ، بينت النظرية الموجية أن نصف قطر مدار بوهر هو المسافة التي يكبر احتمال وجود الإلكترون عندها . وهي كذلك موقع النهاية العظمى في نمط الشدة . على أن الإلكترون يمكن أن يوجد كذلك في مواقع أخرى كثيرة في الذرة . (تذكر أنه في نمط التداخل الضوئي يمكن أن تتواجد الفوتونات في أماكن أخرى غير مناطق النهايات العظمى) وهكذا نجد أن صورة بوهر للإلكترون وهو

يدور حول النواة في مدار ليست بالصورة الواقعية وفي الحقيقة فان نمط الشدة الذي أوجد من النظرية الموجية ليس حتى على شكل حلقة حول النواة وبدلاً من هذا يكون كره متمركزة حول النواة . وهناك محاولة في الشكل ٢٧ - ١٤ أ لتوضيح هذا. للحصول على صورة ثلاثية الأبعاد للموقف الفيزيائي فان النمط يجب ادارة حول محور رأسي يمر بالمركز ، وتعطى شدة النمط في الفضاء الفرصة لوجود الالكترون هناك .



شكل (٢٧ - ١٤)
للحصول على توزيع
الالكترون في الفضاء يجب
إدارة الأشكال الموضحة
حول محور رأسي وكل
التوزيعات تكون ثابتة على أية
دائرة يكون المحور مركزها .

لنستمر الآن في اعتبار نمط الرنين في الذرة عندما $n = 2$ ولعلك تذكر أن نظرية بوهر تنبأً للالكترون بنصف قطر مقدار $4 \times 0.53 \text{ \AA}$ في هذه الحالة ، في حين أن النظرية الموجية تنبأً بما هو مبين في الشكل ٢٧ - ١٣ ب بالخط المتصل . لاحظ أن - الالكترون يكون وجوده أكثر احتمالاً عند نصف قطر بوهر - كما سبق . ولكنه يستطيع أن يتواجد أيضاً في موقع آخر ، وهذا ليس بمستبعد على أنه كما في الحالة $n = 1$ لا يكون النمط الحقيقي للشدة في الفضاء على شكل مدار دائري وبدلاً من هذا يتكون من دمبرل (كرتان بينهما قضيب) كما في الشكل ٢٧ - ١٤ (ب) . تذكر أن الرسم البياني في الفضاء ينتج بادارة الشكل حول محور رأسي . وكما ترى ينحصر وجود الالكترون في نتوءين مستديرين على المحور .

على أن هذه ليست هي الطريقة الوحيدة التي يمكن لموجة دي برولي للالكترون أن ترن بها في حالة الطاقة عند $n = 2$ فهناك شكلان آخريان للرنين يمكن الحصول عليهما ، وتنتمي الأشكال الثلاثة الى نفس المجموعة لأن العدد الكمي الرئيسي لهم جميعاً هو n وبذا تكون طاقاتهم متساوية . ويوضح الشكلان ٢٧ - ١٤ (ج) و (د) ، أنماط الشدة لهذين الرنينين الآخرين اللذين يعطيان معا توزيعات الالكترون الموضحة بالخط المتقطع في الشكل ٢٧ - ١٣ (ب) .

حين ننتقل الى $n = 3$ فاننا مرة أخرى نجابه بعدة رنينات ممكنة لهذه الطاقة ، فكما رأينا ، عند $n = 1$ كان هناك شكل واحد للرنين ، وعند $n = 2$ كانت هناك

ثلاثة أشكال للرنين . أما عند $n = 3$ فإننا نجد ستة أنماط مختلفة للرنين وبعضها يصبح معقدا جدا ، وبين الشكل ٢٧ - ١٤ (هـ) أحد النماذج

من كل ما سبق نرى أن نظرية بوهر تعتبر تبسيطا مفرطا بفداحة لسلوك الإلكترون في ذرة الأيدروجين . ومفهوم بوهر عن المدارات الثابتة - على وجه الخصوص - يتعذر الدفاع عنه . على أن مستويات الطاقة في الذرة قد تنبأت بها النظرية بشكل صحيح . وكان للعدد الكمي الرئيسي n الذي قدمه بوهر أهمية عظيمة . وعلى الرغم من وجوب الاحتفاظ بتحفظاتنا تجاه نموذج بوهر في الأذهان إلا أن النظرية تعتبر اطارا للموصف المنتظم للذرات وكثيرا ما سنشير إليها . مثال توضيحي ٢٧ - ٤ قدر قيمة عدم التحديد في موضع الكترون في ذرة ايدروجين حينما يكون في حالة الطاقة $n = 1$.

طريقة الحل لعمل هذا سنستعمل الصورة التالية لمبدأ عدم التحديد .

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

ونعلم أن طاقة الجسم في الحالة $n = 1$ هي -13.6 eV ، أو حوالي $2.2 \times 10^{-18} \text{ J}$.
وفضلا عن ذلك ،

$$\frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2}mv^2 = \text{ط. ح.}$$

ولكننا وجدنا عند اشتقاق المعادلة (٢٧ - ٥) أن ط. ح. لالكترون بوهر مساوية عدديا للطاقة الاجمالية للذرة . ومن ثم $2.2 \times 10^{-18} \text{ J} = \text{ط. ح.}$ وبمساوة هذه الكمية مع $p^2/2m$ وحل المعادلة لاييجاد p ، نجد أن ،

$$p = \sqrt{(2)(9 \times 10^{-31})(2.2 \times 10^{-18})} = 2.0 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m}$$

لو أننا جعلنا أقصى قيمة لعدم التحديد في كمية التحرك Δp فإننا نحصل على أدنى قيمة ممكنة للمقدار Δx ولنضع إذن Δp مساوية للمقدار p نفسه وعليه فإننا نجد من علاقات عدم التحديد .

$$\Delta x \geq 0.53 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.53 \text{ \AA}$$

حيث أن نصف قطر الذرة حوالي 5 \AA فإننا نجد أنه لا توجد امكانية مطلقا لتعيين موضع الالكترون في الذرة بدقة . وتنعكس النظرية الموجية هذه الحقيقة بالدلالة على أن الالكترون يمكن أن يوجد خلال الذرة .

٢٧ - ٩ الاعداد الكمية ومبدأ باولي للاستبعاد

لقد وجدنا فيما سبق أن ذرة الأيدروجين والكثرونها يمكن أن تتواجد في مستويات محددة للطاقة يميزها عدد صحيح هو n ، ووجدنا على وجه الخصوص أن مستويات الطاقة تعطى بالمعادلة ،

$$E_n = \frac{-13.6Z^2}{n^2} \text{ eV}$$

يتراوح العدد الصحيح n من 1 الى ∞ عندما تتخذ الذرة طاقات مسموح بها متعددة . وعلى الرغم من وصولنا لهذه النتيجة باستخدام نموذج بوهر ، إلا أن الصورة الموجية المبينة على معادلة شرودنجر تقودنا أيضا الى نفس هذه النتيجة . ومن ثم نجد أن n يعتبر بارامتر (معاملا) أساسيا يلزم لوصف حالة ذرة الأيدروجين ، كما ذكرنا من قبل يسمى العدد الكمي الرئيسي . لاحظ أنه يميز مستوى الطاقة الذي يوجد فيه الالكترون . لقد صور بوهر كل قيمة من قيم n على أنها مصاحبة لمدار خاص من مدارات الالكترون ولكن هذا قد ثبت - كما أشرنا في القسم السابق - أنه أمر يصعب الدفاع عنه . وعلى الرغم من هذا فمن شائع الاستعمال أن يقال أن كل قيمة من قيم n تناظر قشرة خاصة (بدلا من مدار خاص) تحيط بالنواة ، فحين تكون الذرة في مستوى الطاقة $n=3$ مثلا ، فمن المعتاد أن يقال أن الالكترون في القشرة $n=3$.

قشرات الذرة

لقد وجدنا في القسم السابق أيضا أن هناك أكثر من شكل ممكن لرنين الموجة عند نفس الطاقة أى عند نفس قيمة العدد الكمي الرئيسي n . وتبين النظرية الموجية أن هناك عدداً كميان آخران يجب تحديدهما حتى نتمكن من تسمية رنين موجي معين داخل الذرة . وأحد هذه الاعداد وهو العدد الكمي المداري يرتبط بكمية التحرك الزاوي لالكترون بوهر في مداره الرئيسي ويرمز لهذا العدد بالرمز l ويتخذ قيما صحيحة من الصفر حتى $(n-1)$. فنحصر قيم l الممكنة بقيمة واحدة عندما تكون $n=1$ ، على سبيل المثال ، وهي $l=0$. عندما $n=2$ يصبح من الواضح أن l يمكن أن تأخذ القيم 0 و 1 لأن $n-1=1$ في هذه الحالة .

العدد الكمي المداري

أما العدد الكمي الثالث وهو المسمى العدد الكمي المغناطيسي فيمكنه أن يتخذ مثلاً $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ويشتمل بالرمز m_l ، عندما تكون $n=4$ و ، مثلاً ، فإن أكبر القيم الممكنة للعدد l هي 3 ومن ثم تأخذ m_l القيم $3, 2, 1, 0, -1, -2, -3$. ويعني ذلك أن هناك سبعة أشكال مختلفة للرنين عندما تكون $n=4$ و $l=3$ وبالإضافة إلى ذلك هناك خمسة أشكال للرنين عندما $l=2$ وثلاثة عندما $l=1$ وشكل واحد عندما $l=0$ ومن ثم فالذرة يمكن أن تتواجد في $16 = 1+3+5+7$ رنيناً مختلفاً لكل منها نفس الطاقة وهي طاقة المستوى $n=4$

العدد الكمي المغناطيسي

في الختام هناك شرط كمى للالكترونون نفسه ، فكما نوهنا فيما سبق يتصرف العدد الكمى للتدويم (الدور) الالكترونون كمغناطيس صغير بسبب تدويمه حول محور يخترق مركزه . وهذا المغناطيس يمكنه أن يتخذ وضعين فقط بالنسبة لمجال مغناطيسى خارجي قد تجد الذرة نفسها موضوعة فيه . فهو قد يصطف موازيا أو موازيا ومضادا لاتجاه خط المجال . ونميز هذا الأمر بتسمية العدد الكمى للتدويم ويرمز له بالرمز $m_s = \pm \frac{1}{2}$ ، وتمثل الاشارتان الموضع الموازي والموازي المضاد .

لقد وجدنا أذن أنه يلزم أربعة أعداد كمية لوصف حالة الكترون في ذرة ما ،

الرئيسى : $n = 1, 2, \dots$

المدارى : $l = 0, 1, \dots, n - 1$

المغناطيسى : $m_l = 0, \pm 1, \dots, \pm l$

التدويم : $m_s = \pm \frac{1}{2}$

هناك لكل مجموعة معينة من قيم n, l, m_l نمط رنين موجي محدد جدا لموجة الالكترونون داخل الذرة . ولتحديد هوية الكترون ما بشكل تام فاننا يجب أن نعرف ما اذا كان تدويم الالكترونون متجها مع ($m_s = \frac{1}{2}$) أو ضد ($m_s = -\frac{1}{2}$) المجال المغناطيسى . ونطلق على كل مجموعة من الأعداد الكمية n, l, m_l, m_s حالة الكترونية للذرة وسنرى الآن أن هناك قانونا طبيعيا غاية في الأهمية ينطبق على سلوك الالكترونون في الحالات المتاحة .

وقد استطاع باولى تقدير أهمية تعيين هذه الحالات - كما فعلنا - بشكل تام عام ١٩٢٥ لأول مرة ، ويمكن لاكتشافه أن يلخص ببساطة شديدة وهو يعرف بمبدأ الاستبعاد لباولي :

لا يمكن لالكترونين في ذرة ما أن يكون لهما نفس الأعداد الكمية الأربعة ، أى لا يمكن لالكترونين أن يتواجد في نفس الحالة .

وهذا المبدأ أساسى لفهم التركيب الالكتروني للذرات كما سنرى في القسم القادم .

٢٧ - ١٠ الجدول الدورى

لقد انصب جل اهتمامنا حتى الآن على الذرة ذات الالكترون الواحد فقط ، وهذه قد تكون الأيدروجين أو الهليوم وحيد التأين أو الليثيوم ثنائى التأين وهكذا ، وقد أصبحنا الآن في وضع يسمح لنا بمناقشة كيفية ترتيب الالكترونات الإضافية في الذرات عديدة الالكترونات والتي توجد في الطبيعة ومسجلة في الجدول الدورى . وللقيام بهذا سنستفيد مرة أخرى من مفهوم القشرات الالكترونية حول النواة ، فكل قيمة من قيم n

تصاحبها قشرة . علاوة على ذلك ، سنفترض أن نفس عمليات الرنين التي أوجدناها للذرات وحيدة الإلكترون يمكن نقلها بصورة كيفية الى ذرات أكثر تعقيدا . ويعنى هذا أننا سنستخدم الحالات الالكترونية التي تحددها الاعداد الكمية : n, l, m_l, m_s التي ناقشناها في القسم السابق .

والسؤال المطروح الآن هو : كيف ترتب الالكترونات أنفسها في الحالات الذرية المختلفة عندما يوجد في الذرة أكثر من الكترون ؟ فهناك ستة الكترونات ، مثلا ، في كل ذرة كربون ففي أى مستوى للطاقة وفى أية حالة الكترونية يمكن أن نجد هذه الالكترونات ؟ تكمن اجابة هذا السؤال في الاستعانة بالقواعد الثلاثة ، التي سبقت مناقشتها :

للذرة المتعادلة عدد من الالكترونات مساو لعدد الذرى Z

في الذرة غير المستثارة تكون الالكترونات فى أدنى حالات الطاقة الممكنة .
لا يمكن أن يكون لالكترونين في ذرة ما نفس الاعداد الكمية الأربعة (مبدأ الاستبعاد) .

لنستعمل الآن هذه القواعد في تحديد التركيب الالكتروني للذرات غير المستثارة في الجدول الدورى .

الهيدروجين ($Z = 1$) سيكون الكترونها الوحيد فى المستوى $n = 1$ وهو أدنى مستوى طاقة ممكن ولا يمكن أن يحدث خرق لقاعدة الاستبعاد .
هليوم ($Z = 2$) يمكن لكل من الكترونيه الاثنين أن يتواجدا فى المستوى $n = 1$ لأنه يمكن أن يكون لهما الاعداد الكمية غير المتشابهة التالية :

الالكترون	n	l	m_l	m_s
1	1	0	0	$+\frac{1}{2}$
2	1	0	0	$-\frac{1}{2}$

ولكن حيث أن هذه هى الطرق الوحيدة الممكنة لتشكيل الاعداد الكمية للحالة $n = 1$ ، فإنه لا يمكن لالكترون ثالث أن يدخل هذه القشرة ، أى أن القشرة قد امتلأت .

ليثيوم ($Z = 3$) لهذه الذرة ثلاثة الكترونات ولذا لابد أن يذهب الالكترون الثالث الى القشرة $n = 2$ ويكون لدينا ،

الكثرون	n	l	m_l	m_s
1	1	0	0	$\pm \frac{1}{2}$
2	1	0	0	$-\frac{1}{2}$
3	2	0	0	$\pm \frac{1}{2}$

وحيث أن هذا الالكثرون الثالث يقع في مستوى الطاقة الثاني ، لذا يكون من السهل إزالة من الذرة عن الالكثرونين الآخرين . ومن ثم تفقد ذرة الليثيوم واحدا من الكثروناتها في التفاعلات الكيميائية وتكون احادية التكافؤ .

من الواضح أن هناك قليل من التشكيلات الممكنة للاعداد الكمية عندما $n=2$ ولو أنك عددتهم لوجدت أن هناك ثمانية طرق كما يلي :

n	l	m_l	m_s
2	0	0	$\pm \frac{1}{2}$
2	1	0	$\pm \frac{1}{2}$
2	1	+1	$\pm \frac{1}{2}$
2	1	-1	$\pm \frac{1}{2}$

وعلى ذلك يتواجد في القشرة $n=2$ ثمانية الكثرونات ، ومعنى هذا ان القشرة لن تصبح مغلقة إلا حين يصل العدد الذرى للعنصر $Z=10$ وهو عنصر النيون . وهو كما تعلم غاز خامل وسبب خموله أن له قشرة مغلقة . بالنسبة للعنصر التالى $Z=11$ وهو الصوديوم وهو أحادى التكافؤ نظرا لأن الالكثرون الإضافى يكون بمفرده في القشرة $n=3$ ومن السهل الى حد ما إزالته .

كلما تقدمنا الى العناصر ذات القيم العالية للعدد الذرى Z فى الجدول ، كلما صار مفهوم القشرة أقل فائدة . فالمشكلة تظهر أساسا لأن الفواصل بين مستويات الطاقة تصبح صغيرة نسبيا عند القيم العالية للعدد n . وفى تلك الحالات يسهم التنافر بين الالكثرونات المختلفة فى الذرة بطاقات من الكبر أحيانا بحيث تلغى تأثير فروق الطاقة بين القشرات ، وعلى الرغم من هذه المضاعفات فإن استخدام مفهوم القشرة قد أثبت فائدته فى الاعتبارات الكيفية .

٢٧ - ١١ إنتاج أشعة X

نعلم أن الذرات تبتعث ضوءا أو شعاعا ك.م. آخر حينما يسقط الكثرون من مستوى طاقة عال الى آخر أدنى منه . بالنسبة للاندروجين والأيونات وحيدة الالكثرون ، تكون الأطياف بسيطة الى حد كبير وذلك لأن مستويات الطاقة بالنسبة لها تعطى بالعلاقة ،

$$E_n = -\frac{13.6Z^2}{n^2} \text{ eV}$$

أما في الذرات الأخرى فإن الإلكترونات الداخلية تتأثر بشدة بالنواة القريبة ولذا تنطبق هذه العلاقة بشكل أفضل بالنسبة لهم . وتجدر الملاحظة ، بشكل خاص ، أن شحنة النواة مؤثرة جداً في تحديد هذه المستويات الداخلية . في حالة $Z = 100$ ، مثلاً ، تكون الطاقات المتضمنة ، أكبر 10,000 مرة عما هي للإيدروجين وتبعاً لذلك تكون الفوتونات المبعثة عند هبوط الإلكترون من القشرة $n=2$ إلى القشرة $n=1$ في عنصر ذي Z كبيرة - ذات طاقات تقع في نطاق $100,000 \text{ eV}$ وهذا يناظر طولاً موجياً قدره $1240/100,000 \text{ nm}$ أو حوالي 0.012 nm وهو طول موجي يقع في مدى أشعة x .

وعلى الرغم من أن ذرات العناصر الثقيلة قادرة على ابتعاث أشعة x إلا أنها لا تفعل ذلك مالم تستثار بطريقة صحيحة . ففوتون أشعة اكس لا يبتعث مالم يهبط إلكترون من قشرة خارجية للذرة إلى ثغرة في قشرة داخلية ، ولما كانت الذرات غير المستثارة لا تملك ثغرات في تلك القشرات لذا فأشعة x لا تبتعث منها . الذرة ، إذن يجب أن تستثار أولاً بحيث يلقي الإلكترون الموجود في القشرة $n=1$ أو $n=2$ خارج القشرة مخلفاً بذلك ثغرة يمكن للإلكترون خارجي أن يهبط فيها ويتم انجازه . هذا عادة في أنبوبة أشعة x كالمبينة في الشكل (٢٧ - ١٥) (أ) .

تعجل الإلكترونات - كما هو موضح في الشكل - المبتعثة من الفتيلة الساخنة خلال فرق الجهد يبلغ حوالي 10^5 V . وحين تصطدم هذه الإلكترونات ذات الطاقة العالية بالذرات ذات Z العالية في الهدف فإن الإلكترونات تقتلع من القشرات الداخلية للذرات . وحين تسقط الإلكترونات أخرى داخل هذه الثغرات ، تبتعث فوتونات أشعة x . لأشعة x المتولدة بهذه الطريقة أطوالاً موجية مميزة لفرق الطاقة بين القشرات المختلفة داخل الذرة . ومعنى هذا أن الفوتونات المبتعثة تحمل طاقة تساوي الفرق في الطاقة بين القشرتين اللتين تعتبران كنقطة بداية ونقطة نهاية للإلكترون الهابط إلى الثغرة . وتعرف أشعة x المبتعثة في العملية باسم أشعة x المميزة .

أشعة x المميزة

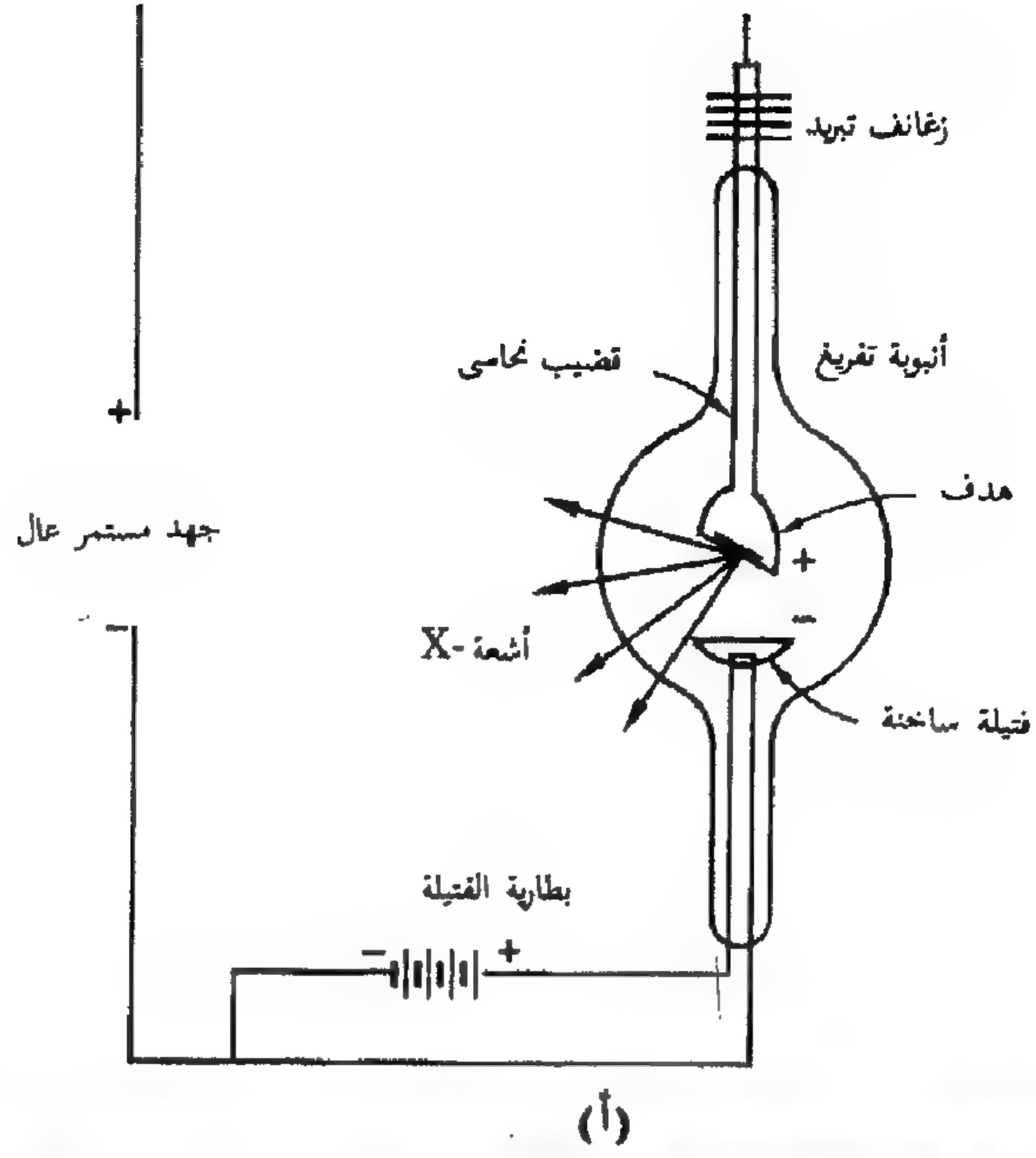
تعريف

هناك نوع آخر من أشعة x المبتعثة من هدف حين يقذف بالإلكترونات وهذا النوع يعرف باسم أشعة الفرملة وهو مشتق من الكلمة الألمانية التي معناها (اشعاع الفرملة) . وكما يتضح من الاسم تبتعث هذه الأشعة من الإلكترونات المقذوفة عندما تبطأ حركتها فجأة عند

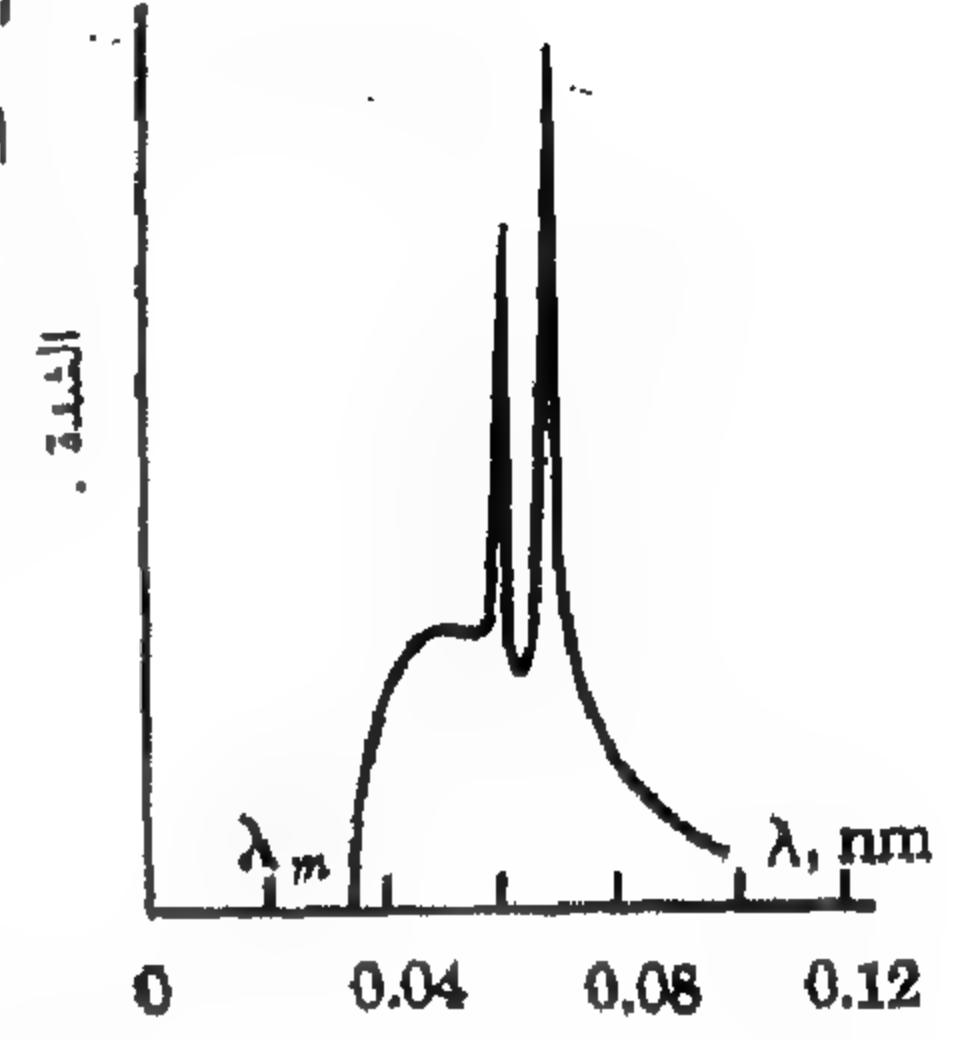
تعريف

أشعة الفرملة

شكل (٢٧ - ١٥)
 (أ) تقوم الإلكترونات المبعثة
 من الفتيلة الساخنة بضرب
 الهدف فيقوم الهدف بدورة
 بابتعاث أشعة X (ب) نظام
 أشعة X للأعمال الروتينية .
 وقد استخدم هذا النظام
 للحصول على الصورة
 الفوتوغرافية المينة في صفحة
 ٩٥
 (ب) شركة هيوليت - باكادر .



التصادم مع الهدف . نحن نعلم أن أية شحنة معجلة تقوم بإصدار أشعة كهرومغناطيسية (كالشحنات المهتزة على هوائى مثلا) . ومن ثم تقوم هذه الالكترونات المتصادمة أيضا ببعث اشعاع حينما تبطأ بشدة في الهدف . وحيث أن معدل التباطؤ يكون كبيرا فإن الاشعاع المبعث يكون نتيجة لذلك ذا طول موجى قصير وتكون أشعة الفرملة بهذا في نطاق أشعة x . ولكن أشعة الفرملة - على عكس الأشعة المميزة - تكون ذات مدى متصل من الأطوال الموجية مما يعكس الحقيقة القائلة بأن عملية التباطؤ (التقاصر) يمكن أن تحدث بعدد لا نهائى تقريبا من الطرق المختلفة ، بحيث تتباين الطاقة المحررة بشكل كبير من تصادم لآخر .



شكل (٢٧ - ١٦)
أشعة x المبعثة من هدف
من الموليبدنم عندما يقذف
بالكترونات طاقتها 35000
eV

يبين الشكل ٢٧ - ١٦ رسما بيانيا لاشعاع المبعث من هدف من الموليبدنم حين يقذف بالكترونات طاقتها 35.00 eV . القمتان الحادثتان في الرسم هما أشعة x المميزة التي تبتعث عندما تهبط الالكترونات الى القشرة $n=1$ لهذه الذرة من قشراتها $n=2$ و $n=3$ ويكون أقصر الأطوال الموجية هو بالطبع ما يناظر الانتقال ذى الطاقة الاكبر أى الانتقال من $n=3$ الى $n=1$. تعتبر أشعة الفرملة هي السبب وراء انتشار الاشعاع ذى الشدة المنخفضة على مدى الأطول الموجية الأطوال من λ_m . وحيث أن طاقة الالكترونات في الشعاع الأصيل كانت 35,000 eV فإن الفوتونات المبعثة لا تستطيع أن تكون طاقتها أكبر من هذه القيمة . وباستخدام التحويل الذى تعلمناه من أن 1240nm تكافئ طاقة قدرها 1 eV نجد أن 35.000 تناظر $0.035 \text{ nm} \approx (1240 \text{ nm}) / (35,000 \text{ eV})$. وكما نرى من الشكل ٢٧ - ١٦ ، يكون لاشعة الفرملة ذات الطاقة القصوى هذا الطول الموجى بالفعل .

مثال توضيحي ٢٧ - ٥ استخدم البيانات المعطاة في الشكل ٢٧ - ١٦ لكى توجد فرق الطاقة بين المستويين $n=1$ ، $n=2$ في الموليبدنم .
طريقة الحل لقد وجدنا في مناقشة الشكل ٢٧ - ١٦ أن قمة الطول الموجى الأطول في الشكل وهى 70°A تنتج من الانتقال $n=2$ الى $n=1$. وعلى هذا فالفوتون الذى طوله الموجى 0.07 nm الى القشرة سيحمل بعيدا طاقة قد فقدها الالكترون عند هبوطه من القشرة $n=2$ الى القشرة $n=1$. ولكما كانت 1240 nm تناظر 1 eV فإن 0.07 nm يجب أن تناظر طاقة قدرها 1240/0.07 أو حوالى 18,000 eV ، ومن ثم يكون فرق الطاقة بين هاتين القشرتين في ذرات الموليبدنم إلى 18.000 eV

٢٧ - ١٢ الطيف الخطى والشريطى والمستمر .

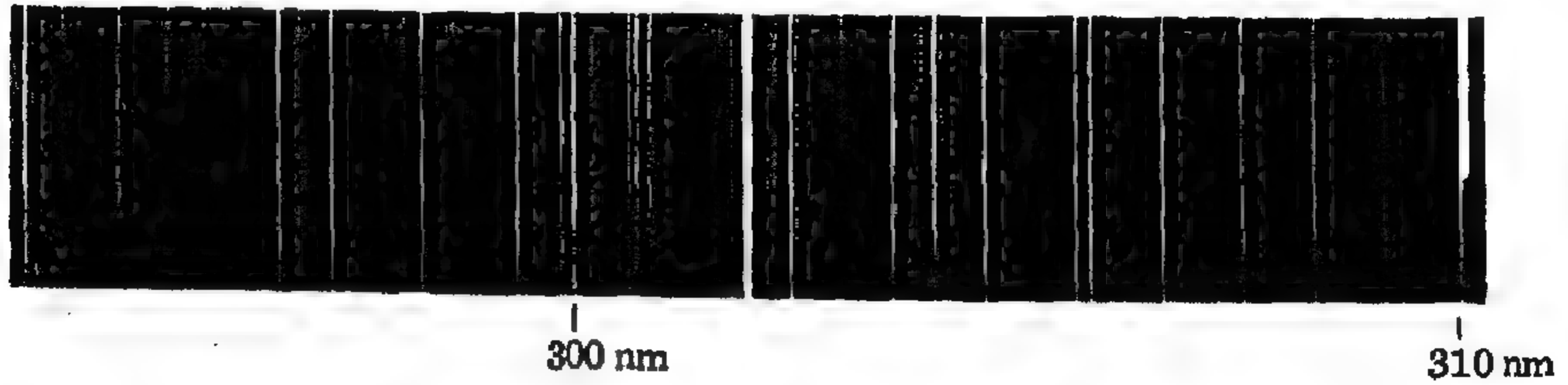
يبلغ فرق الطاقة بين القشرتين $n=1$ ، $n=2$ عشرات الآلاف من الالكترون فولت للذرات المحتوية على العديد من الالكترونات كما رأينا في القسم السابق . وحيث

أن فروق الطاقة بين القشرات الداخلية بهذا القدر من الكبر لذا كثيرا ما يهمل التفاعل بين الكترون وآخر لصغر تأثيره . على أنه حين نتقدم الى خارج الذرة نحو القشرات ذات قيم n المرتفعة نجد أن فروق الطاقة بين القشرات قد أصبح يقارن بطاقات التفاعل بين الالكترونات في نفس الذرة . نتيجة لهذا ينشق كل مستوى طاقة - حسب بوهر - الى العديد من المستويات المحددة مما يعقد الرسم البياني لمستويات الطاقة في الذرة . ويجعل هذا التأثير مستويات الطاقة للالكترونات الخارجية ، تصير معقدة بشكل لا أمل فيه بالنسبة لذرات كالحديد والذهب . ولما كانت الرسوم البيانية لمثل تلك الذرات تفتقر الى البساطة الأساسية التي لمستويات الأيدروجين لذا فان الطيف الخاص بالأطوال الموجية المبعثة من تلك الذرات هو أبعد ما يكون عن البساطة .

فهناك عدد هائل جدا من خطوط الطيف لمعظم هذه الذرات ذات قيم Z العالية والتي تلاحظ للاشعاع المبعث منها ، و ليس هناك انتظاما ملحوظا في تلك الأطياف مثلما هو قائم في متسلسلة بالمر مثلا . وكمثال على مقدار تعقيد هذا الطيف نرى الشكل ٢٧ - ١٧ حيث يعطى جانب صغيرا جدا من الطيف المبعث من ذرات الحديد المبخرة في قوس كهربى ساخن وهذا نموذج لأطياف الذرات ذات العدد الذرى الكبير . وعلى الرغم من هذه التعقيدات الا أن الطيف الخطى للعناصر يعتبر ذا فائدة عملية كبيرة . فحيث أن كل عنصر يصدر خطوط الطيف المميز له ، لذا يكتشف وجود هذا العنصر بسهولة بالطرق الطيفية . فالمادة يمكن تحليلها ، مثلا لدراسة مكوناتها الذرية بواسطة تبخيرها في قوس ثم قياس خطوط الطيف الصادرة عن الذرات المستثارة في بخار المادة . وهذا الأسلوب التقنى ، وهو دراسة طيف الابتعاث ، يستخدم روتينيا لتحديد تركيب المواد غير العضوية كما وكيفا . يلاحظ أن الذرات في هذا الأسلوب يتم تبخيرها ويتكون طيفها من خطوط طيفية محددة بما يطلق عليه طيف خطى راجع اللوحة الملونة التي تعطى أمثلة للأطياف الخطية .

الاطياف الخطية

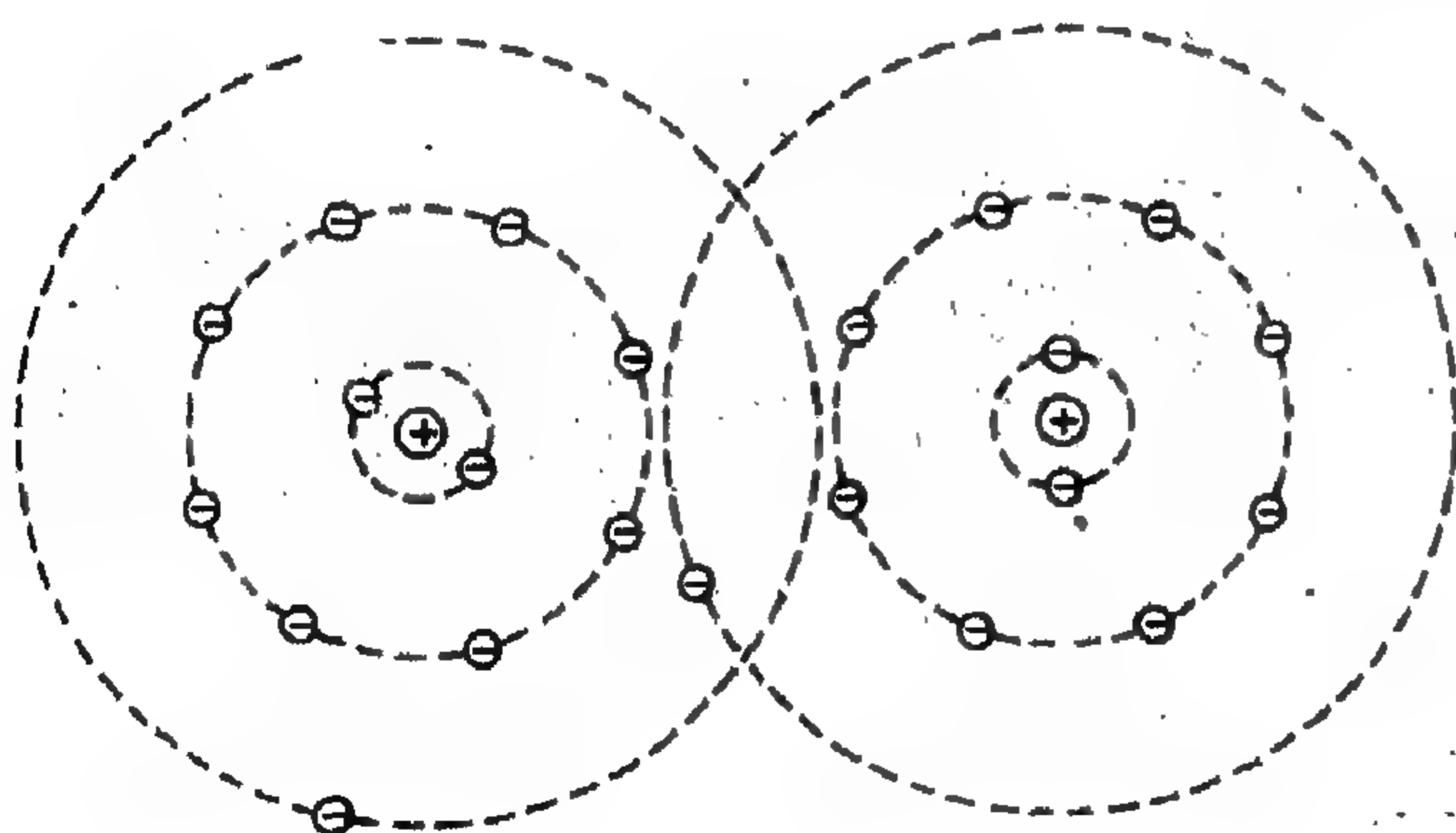
شكل (٢٧ - ١٧)
جانب صغير من طيف
الحديد



قبل أن نستمر في دراسة الطيف المبعث (أو الممتص) بواسطة الذرات في الجزيئات والاجسام الصلبة، علينا أن نلخص متطلبات الطيف الخطي. ينشأ الطيف الخطي في حالة ذرات متباعدة جدا عن بعضها البعض بحيث ينشأ موقف يمكن فيه الحديث عن قشرات الكترونية محددة حول النواة وحين يهبط الكترون من قشرة الى أخرى فان قدرا محددا بدقة من الطاقة هو الذى يفقد ومن ثم يبعث طول موجي محدد من الضوء وهو نفسه الذى يصدر عن الذرات المتشابهة كلها وهذا الضوء يظهر كخط في الاسبيكترومتر - (المطياف). يكون طيف الذرات المنفصلة، اذن، طيفا خطيا وبمجرد أن نبدأ في تجميع الذرات معا لتكون سائلا أو صلبا فان هذه الصورة لا تعود صالحة.

اعتبر الذرتين الموضحتين في الشكل ٢٧ - ١٨ وقشراتهما. تتأثر الالكترونات الموجودة في القشرة الثالثة بشكل خطير بالذرة المجاورة ويصبح من الصعب القول بأن طاقة الالكترون في هذه القشرة هي نفس طاقتها في ذرة معزولة منفصلة. على أننا سنفترض للسهولة أن القشرات الداخلية ليست متراكبة بشكل خطير من جانب الذرة المجاورة، وأن طاقات هذه القشرات لم تتغير بشكل كبير.

تؤدي الانتقالات الى قشرات أدنى إلى ابتعاث أطوال موجية قصيرة، تقع عادة في نطاق الأشعة فوق البنفسجية أو أشعة x. أما الأشعاع المرئي أو ما تحت الأحمر فيكون ناتجا عن الانتقالات في القشرات الخارجية. يتضح من هذا، اذن أن الضوء المرئي المبعث يعتمد بشدة على مدى قرب الذرات من بعضها البعض بينما لا يتأثر ابتعاث الأشعة فوق البنفسجية أو أشعة x بهذا الأمر. وتؤكد الحسابات الدقيقة هذا التحليل عندما تتقارب الذرات المنفصلة تصبح طاقات الالكترونات الممكنة في القشرات الخارجية غير محددة تماما ومن ثم لا يؤدي انتقال الالكترونات بين هذه القشرات الخارجية في جسم صلب أو سائل، الى ابتعاث خطوطا حادة للأطوال الموجية.



شكل (٢٧ - ١٨)
تميل الذرات في جسم صلب
الى التراكب ومن ثم تصبح
الطاقات المميزة للمدارات
الخارجية سعة التحديد
وتصبح خطوط الطيف منتشرة

حين يسخن جسم صلب أو سائل للدرجة أن يصدر عنه ضوء فان هذا الضوء يبعث عندما تهبط الالكترونات الذرية الخارجية من قشرة خارجية الى أخرى . وحيث أن هذه القشرات وطاقتها تعتبر منتشرة لذا يبعث مدى بأكمله من الأطوال الموجية . والطيف بهذا لا يعود محتويا على خطوط طيفية مرئية محددة وانما يتكون بدلا من هذا من تشويش لوني مستمر وعريض لا يلحظ فيه أثر لخطوط متفردة . يسمى هذا النوع من الطيف طيفا مستمرا .

الطيف المستمر

ويبعث هذا الطيف من الاجسام المتوهجة مثل المعادن المنصهرة أو الفتيلة الساخنة في مصباح للاضاءة . ويمكن رؤية مثال على هذا النوع من الطيف في اللوحة الملونة السابقة . وحيث أنه لا يرى أية خطوط طيفية محددة في الطيف المستمر لذا يصبح غير مفيد في تحليل التركيب الجزيئي لجسم صلب .

الأطياف الشريطية

النوع الثالث من الطيف هو الطيف الشريطي ، وهو يبعث من الجزيئات . وهذا النوع وسط بين طيف الأجسام الصلبة وطيف الذرات الحرة . وتقريب أولى يمكن القول بأن ادخال ذرة في جزيء لا يغير كثيرا من طيف الالتهاعات الذرى ، لمستويات الطاقة المميزة لالالكترونات التكافؤ فقط هي التي يعثرها التغير الخطير . على أن ادخال الذرات في جزيء ما يؤدي الى ظهور مجموعة جديدة بأكملها من مستويات الطاقة ، التي تميز ذبذبات تتضمن الروابط المعسكة بالذرات معا داخل الجزيء .

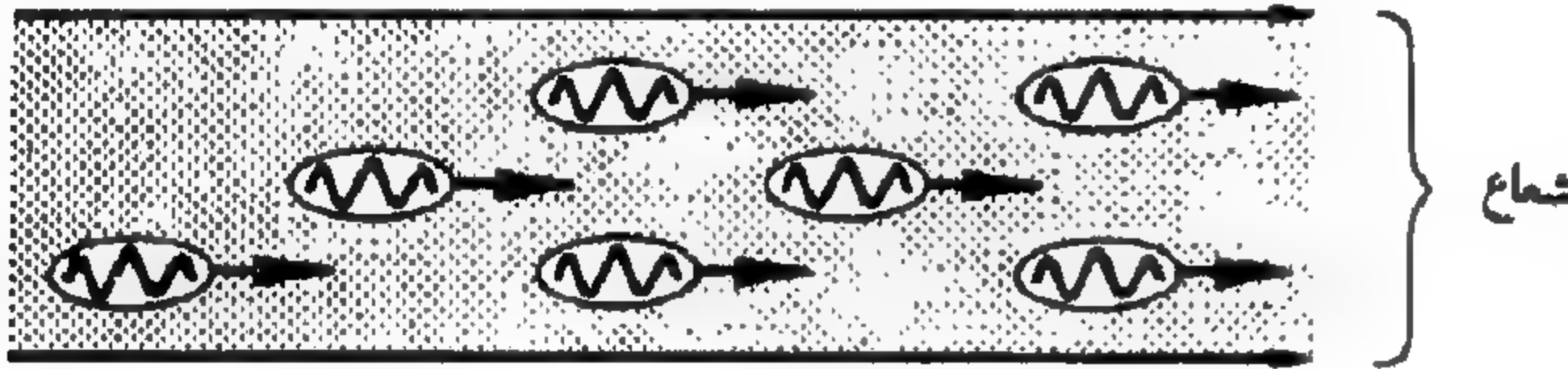
ولعلك تذكر أن بلانك قد اكتشف أن أى نظام يتذبذب بتردد طبيعى مقداره ν_0 سيكون له سلسلة من مستويات الطاقة يفصل بين كل اثنين منها طاقة قدرها $h\nu_0$. وفي الحقيقة لكل رابطة كيميائية مختلفة تردد مميز للذبذبة وتؤدي الرابطة الى سلسلة مميزة من مستويات الطاقة . ومن الأمثلة النموذجية تردد الرابطة C-N الذى يبلغ 3.24×10^{12} Hz وتردد C-C الذى يبلغ 3.4×10^{12} Hz وتردد C=C البالغ 6.5×10^{12} Hz

عندما يهبط جزيء مهتز من مستوى طاقة اهتزازية الى آخر فان فوتونا من الطاقة $h\nu_0$ يبعث . وهذه الطاقة تبلغ 0.014 eV في حالة رابطة C-C وتؤدي الى فوتون له $\lambda = 88,000$ nm وهو طول موجى يقع في المدى تحت الأحمر . تعتبر الفوتونات المبتعثة مميزة للرابطة الجزيئية ويمكن استخدامها في التعرف على الروابط داخل الجزيئات . وهذا الاسلوب التقنى المعروف باسم دراسة طيف الأشعة تحت الحمراء ، يستخدم روتينيا لتحليل والتعرف على المركبات العضوية .

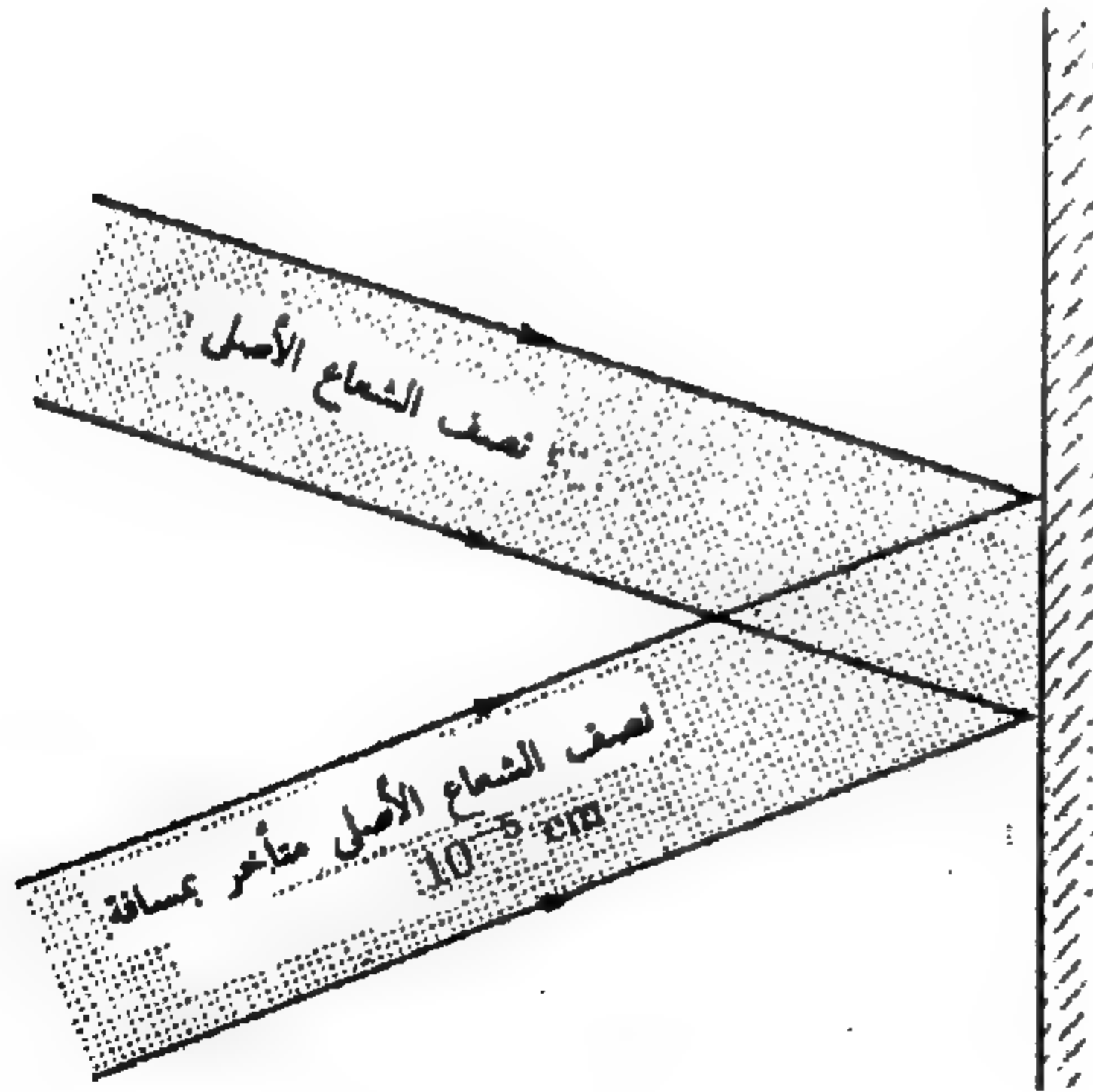
٢٧ - ١٣ التماسك (Coherency)

لقد وجدنا أن الضوء واشعاعات ك.م.ج أخرى تبتعث من الذرات والجزيئات عندما تهبط من حالة مستثارة الى حالة ذات طاقة أدنى . ويبعث فوتون عند كل انتقال . ويعطى تردد الموجة في نبضة الطاقة بالمعادلة الطاقة $h\nu$ ولكن الموجة تمتد لمسافة قصيرة جدا في الفضاء وقد حاولنا أن نمثل الموقف بطريقة تخطيطية في الشكل ٢٧ - ١٩ .

فكما هو مبين هنالك ، يتكون شعاع الضوء أحادي اللون من فيض من كمات الضوء . وكل من هذه الكمات ذو طول محدد ويحتوى على عدد محدود من الأطوال الموجية على امتداد طوله . (أكثر مما هو مبين) ولكل هذه النبضات نفس الأطوال الموجية تقريبا لأنها نشأت من انتقال ذرى وحيد ، على الرغم من ان كل منها ابتعثت من ذرة مختلفة . ونتيجة لهذا ليست هناك أية علاقة محددة في الزمن أو الموضع بين هذه النبضات ، فهي قد ابتعثت عشوائيا من الذرات ولذا يكون لموجاتها علاقات طورية عشوائية بالنسبة لبعضها البعض . يطلق على شعاع كهذا - تكون فيه



(أ) فوتونات غير متماسكة



(ب) أشعة متماسكة

شكل (٢٧ - ١٩)
تمثيل تخطيطي لشعاع من
الضوء العادى (فوتونات غير
متماسكة) (ب) باستخدام
شعاع مزدوج أو الانعكاس
من على غشاء رقيق يمكن
فصل الشعاع الى شعاعين
متماسكين .

للفوتونات أطوار (و/أو) أطوال موجية عشوائية - شعاع أو نبضة متماكة ، تعريف

نبضات الشعاع غير المتماكة

لنعتبر ما يحدث حين يسقط مثل هذا الشعاع على ساتر أو على شبكة العين . قد يسقط فوتونان أو أكثر في نفس البقعة في نفس اللحظة ، فإذا كانت موجاتهما متطابقة فإن شعاعتهما تجمع وتقوى كل منهما الأخرى أما إذا اختلفتا في الطور بزاوية قدرها 180° فإن أحدهما تلغى الأخرى . وحيث أن النبضات عشوائية الطور بالنسبة لبعضها البعض لذا فستحدث تقوية والغاء (وأي شيء بينهما) كلما تقدم الزمن وسقطت الفوتونات على الساتر . لو استطعنا أن نسجل شدة الضوء ونبين تفاصيل تغيرها لفترات تصل في القصر إلى 10^{-10} s لسجلنا شدة ضوء متغيرة بشكل كبير على الساتر . وسيكون هذا سجلا للتقويات والالغاءات للفوتونات عندما تسقط على الساتر .

ولكن معظم نبيطات قياس الضوء ، بما في ذلك العين ، تسجل فقط متوسط الشدة خلال فترة زمنية أطول بكثير من 10^{-10} s . ونتيجة لهذا فإن شعاع الفوتونات غير المتماكة سيبدو لامعا وإن كان ليس في لمعان شعاع فوتوناته يقوى بعضها الآخر . وحتى لو حدثت إلغاءات داخل الشعاع ، فإنها تستمر لفترة قصيرة جدا لا تكفي لإدراك أية ظلمة . وحتى بهذا فمن الممكن أحداث تداخل بمثل هذا الشعاع كما سنرى الآن .

افترض أن شعاع الشكل ٢٧ - ١٩ (أ) قد قسم إلى جزئين بواسطة شق مزدوج أو بالانعكاس من على سطحى غشاء رقيق . ولنفترض بعد ذلك أن كل فوتون يتكون من نبضة موجية طولها 30 cm^* ، أى أن النبضات المبينة في الشكل يبلغ طولها 30 cm ، فإذا ما أعيد وصل الشعاعين (كما في الشكل ٢٧ - ١٩ ب) بعد أن يكون أحدهما قد قطع مسافة أبعد من الآخر بقليل ، فإن نصفي كل فوتون سيوصلان وهما متفاوتان في الطور بدرجة ضئيلة وتكون النتيجة أن كل فوتون قد شق إلى نصفين بالطول وتكون سعة كل منهما أقل وفيما عدا هذا لا يطرأ أى تغيير على الفوتونات . أحد نصفي الفوتون قد امسك بالخلف بالنسبة للنصف الآخر ، ثم أعيد وصل النصفين . وطالما كان الفرق في طول المسار صغيرا بالمقارنة بطول النبضة الموجية فإن تأثيرات واضحة للتداخل ستظهر عندما يعاد وصل نصفي الموجه . فإذا كان فرق المسار مساويا $n\lambda$ (حيث n عدد صحيح) فإن تداخلا بناءا وسطوعا سيظهران على الساتر . أما إذا كان فرق المسار مساويا $(n\lambda + \frac{1}{2}\lambda)$ فإن تداخلا إتلافيا هو

* افترض على سبيل المثال أن الذرة يلزمها زمن قدرة 10^{-9} s لكي تهبط من حالة إلى أخرى ، وخلال هذه تهبث نبضة ، الطرف الأمامى للنبضة سينتقل مسافة قدرها $c\tau = 0.3 \text{ m}$ في تلك الفترة ولهذا يكون طول النبضة 30 cm

الذى يحدث ويلاحظ اظلام على الساتر . وهذا هو بالضبط ما يحدث في تجارب التداخل التى وصفت في الفصل الخامس والعشرين .

يؤدى الشعاعان المبيانان في الشكل ٢٧ - ١٩ ب الى تأثيرات مرئية للتداخل على الساتر وهذا يرجع الى أن النبضات الموجية التى تسقط على الساتر من الشعاعين متطابقة وبين بعضها البعض علاقات طورية ثابتة ولذا يقال أن هذين الشعاعين متماسكان . تتكون الأشعة المتماسكة من نبضات موجية تتناظر تماما في كل من الشعاعين وتحتفظ بينها علاقات طورية ثابتة .

تعريف
الأشعة المتماسكة

من الطريف أن الشعاعين يفقدان تماسكهما اذا تأخر احدهما عن الآخر مسافة أبعد من اللازم ، فكل نبضة موجية لها طول محدود فاذا كان فرق المسار للشعاعين أكبر من اللازم فان النبضات لن تعود قادرة على الاتصال عند قمة بعضها البعض عندما يعاد وصل الشعاعين . وبدلا من هذا سيتم جمع فوتونات لا علاقة بينها معاً وكل ما سيوجد هو فرق عشوائى في الطور . ولن يلحظ أى الغاء أو تقوية طويلة المدى .

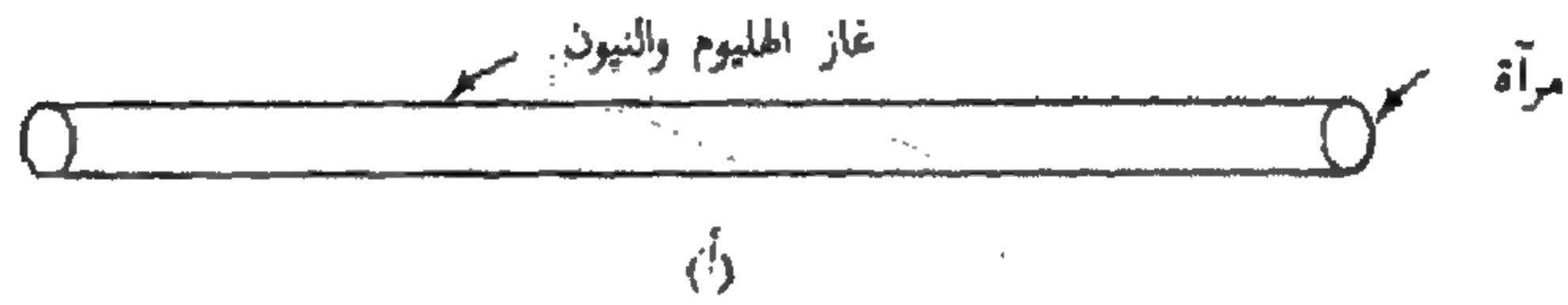
وكما نرى فان النبضات الموجية المنفردة في شعاع ضوئى عادى ليست متماسكة ، فالموجة في احدى النبضات تكون لها علاقات طورية مختلفة تماما عن علاقات الطور للموجات التى في نبضات أخرى . أما الضوء الذى نراه من مثل ذلك الشعاع فهو متوسط حضييلة تأثيرات عشوائية وسريعة جدا للتداخل . ولكن اذا شطر الشعاع الى نصفين ، فيمكن اعطاء كل نصف منهما علاقة طورية محددة بالنسبة للآخر ، ثم اذا جمع الشعاعان المنفصلان مرة أخرى بحيث يصبح الشعاعان متماسكين فان تأثيرات ملحوظة للتداخل سوف تصبح مرئية . على الرغم من أن التقوية يمكن أن تحدث بين جزئى الشعاع ، الا أن شدة الشعاع ستظل محدودة بحقيقة أن النبضات الموجية المنفردة ليست متماسكة . سنتعلم في القسم التالى أشياء عن مصدر الضوء الذى يصدر نبضات موجية متماسكة .

٢٧ - ١٤ الليزر

سنوجه اهتمامنا الآن نحو نبيلة ذات طراز مميز ، تستخدم حقيقة أنه تحت ظروف خاصة جدا يمكن جعل الذرات تبعث موجات ضوئية متطابقة كلها مع بعضها البعض ، وغالبا ما تعمل الذرات في جميع المصادر الضوئية مستقلة عن بعضها البعض ، أى أن ابتعاث فوتون من ذرة ما لا يوجد بينه وبين ابتعاث فوتون من ذرة أخرى أى تنسيق أو ترابط . نتيجة لهذا يتكون شعاع الضوء من خليط معقد من الأمواج الكهرومغناطيسية الصادرة عن ذرات مختلفة . وليست كل هذه الذرات متطابقة

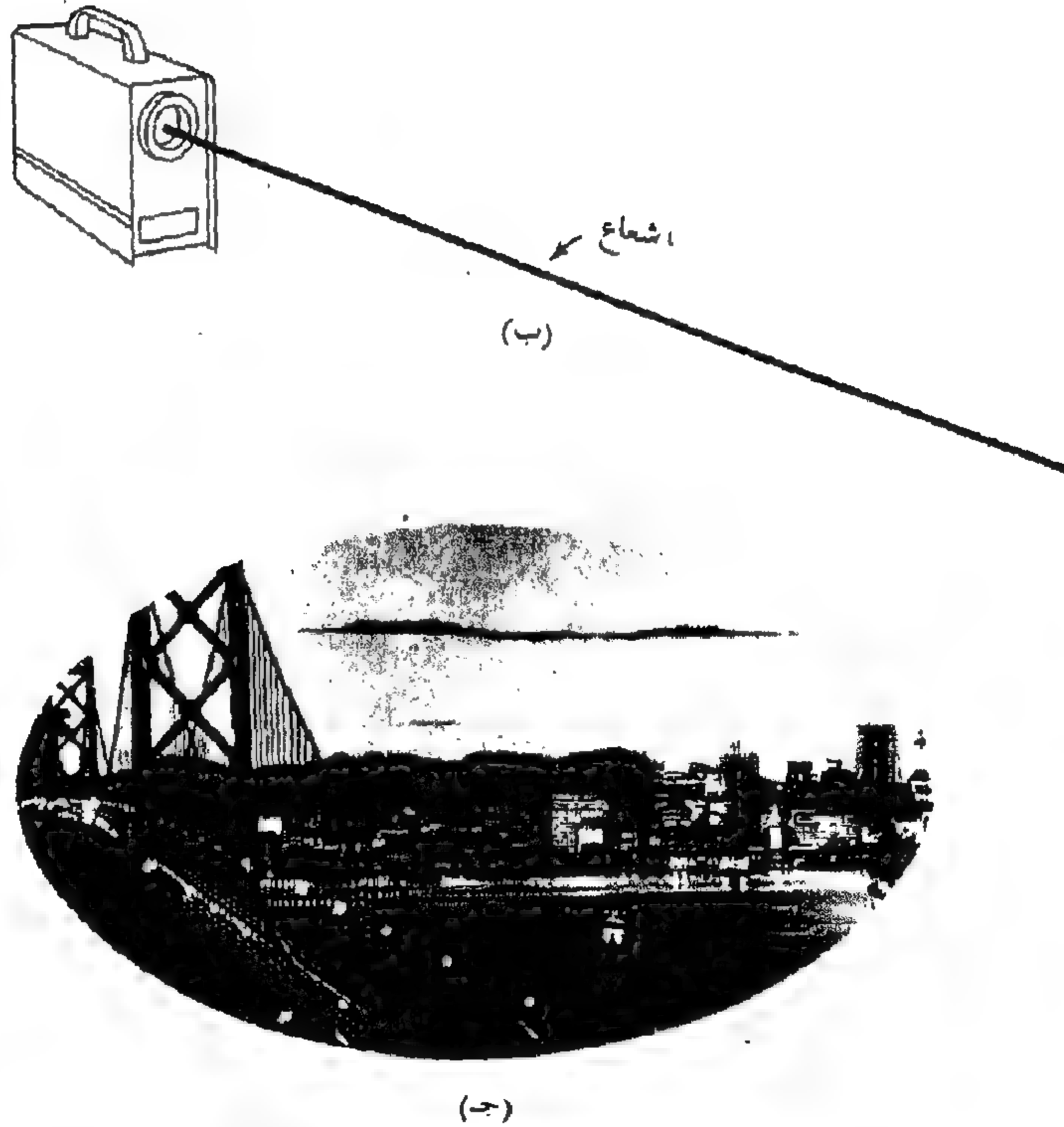
بالطبع مع بعضها البعض ولذا فهي أحيانا تجمع وأحيانا تلتقى . وقد وجدنا في القسم السابق أن هذا يجعل شعاع الضوء أقل كثيرا في الشدة عما اذا كانت كل الذرات متطابقة عند ابتعاثها للموجات . وينشأ شعاع شديد جدا اذا ما أجبرت جميع الذرات على أن تبتعث موجاتها معا وهي متطابقة . وهناك مصدر ضوئي يقترب كثيرا من تحقيق هذا الهدف وهو ما يسمى الليزر .

هناك أنواع كثيرة متاحة من الليزر ولكنها جميعا تعمل بنفس المبدأ الذي اشتق اسمها منه وهو تكبير الضوء بواسطة الابتعاث المستثار للاشعاع (light amplification by stimulated emission of radiation) سنقوم الآن بوصف ليزر الهليوم - النيون الغازي وهو يعطى شعاعا ضوئيا متصلا . يبين الشكل ٢٧ - ٢٠ الخطوط الرئيسية لليزر الهليوم نيون الغازي وهناك أيضا تمثيل لنوعية الشعاع الدقيق الضيق الذي يصدره هذا الليزر .



شكل (٢٧ - ٢)

على الرغم من أن الليزر الذي تنتجه الكثر أو بتكس أسوشيتس (ب) له خرج مقداره 0.0005 W فقط ، إلا أن شعاعه الضيق يسطع بلمعان على بعد (ج) ولدواعى المقارنة لاحظ الاضواء الاقل سطوعا الصادرة من مصابيح عالية الشدة على جسر سان فرانسيسكو خليج أوكلاند . (الكثرر اوبتكس اسوشيتس ، بالواتو ، كاليفورنيا) .



يتكون قلب الليزر من انبوبة زجاجية تحوى غازى الهليوم والنيون عند ضغط منخفض نسبيا . يثبت عند طرفى الانبوبة لوحان زجاجيان على اقصى درجة من التسطح وهما متوازيان مع بعضهما البعض بدقة شديدة . وقد غطى كل لوح ليصبح بمثابة مرآة ، الا أن أحد اللوحين قد خففت تغطيته بحيث يسمح بمرور واحد فى المائة من الضوء الساقط عليه من الداخل لكى يتسرب من خلاله ويغادر الانبوبة .

وليس أى غازين يمكنهما تكوين ليزر غازى . فالغازان اللذان اختيرا فى هذه الحالة بينهما علاقات خاصة جدا وكل منهما يؤدي وظيفة داخل الانبوبة ، فأحد الانواع وهو ذرات الهليوم هى بمثابة مصدر للطاقة بالنسبة للنوع الاخر وهو النيون فى هذه الحالة . وعلى ذرات الهليوم بدورها أن تنال هى الأخرى قسما من الطاقة وهذا يتم بواسطة تفريغ كهربائى على التردد جدا داخل الأنبوبة . ويعمل الهليوم بداخل الانبوبة أساسا كإى غاز فى أية أنبوبة تفريغ غازية كمصباح بخار الزئبق مثلا . ينتج فرق الجهد المرتفع على الانبوبة تفريغا غازيا مما يجعل الكثير من الايونات والالكترونات النشطة تتقاذف هنا وهناك داخل الانبوبة . ثم تصدر ذرات الهليوم المستثارة عندئذ الطيف العادى للهليوم وذلك عندما تهبط الالكترونات عائدة الى المستوى $n=1$. على أن الضوء الصادر عن هذا التأثير يشكل كسرا صغيرا جدا من كمية الضوء المبعثة من الأنبوبة .

من الطبيعى أن الالكترونات فى ذرات الهليوم تقذف الى أعلا نحو جميع مستويات وحالات الطاقة الممكنة للذرة وذلك بواسطة التصادمات بداخل الانبوبة . وقد وجد أن هناك حالة واحدة تكون فيها الطاقة أعلى بما قيمته 20.6 eV عن الحالة $n=1$ وهذه الحالة تسمى حالة مؤقتة الاستقرار . وفى هذه الحالة يقاوم الالكترون الهبوط الى حالات سفلى ولذا تظل الذرة على تلك الحالة لفترات زمنية طويلة بشكل غير عادى . على أن تركيب مستويات الطاقة فى ذرة النيون مهيا بحيث أنه عند تصادم ذرة الهليوم بذرة النيون تقوم ذرة الهليوم المستثارة باعطاء طاقتها لذرة النيون . وفى الواقع ، فإن لذرة النيون المستثارة طاقة أكبر بقليل من طاقة ذرة الهليوم ، وفرق الطاقة هذا يمكن إيجاده من ط . ح . التى تكتسبها الذرة عند التصادم .

واليك ما قد حدث . لقد استثيرت ذرات الهليوم فى التفريغ الغازى وقد ألفت بعض الذرات أنفسها فى حالة مؤقتة الاستقرار وأخذت تتجول هنا وهناك حتى تم التصادم بينها وبين ذرة نيون فأخذت ذرة النيون - أثناء التصادم - الطاقة من ذرة الهليوم وأصبحت فى حالة مستثارة . وهذه الحالة اتضح أنها أكثر استقراراً فى ذرة النيون ولذا لا يهبط الالكترون فيها الى حالة أدنى دفعة واحدة . وبمرور الوقت تقوم ذرات الهليوم باستثارة المزيد من ذرات النيون التى تصبح فى وضع الانتظار حتى تشع طاقاتها . وحين تفعل ذلك فانها تهبط الى مستوى يقل بمقدار 1.96 eV وتطلق فى هذه العملية اشعاعا كهرومغناطيسيا طوله الموجى 6328 \AA ويقع فى المدى الاحمر . وهذا ليس

مفيدا في حد ذاته لأننا سنكون قد استعدنا ما كان يمكن لذرات الهليوم نفسها أن تشعه ببساطة . وتتأقى الفائدة من أننا نستطيع الآن أن نتحكم في ذرات النيون ونجعلها تبعث موجاتها وهي متطاورة .

على الرغم من حقيقة أن ذرات النيون تمنع في الهبوط الى مستوى أدنى للطاقة إلا أن بعضها يفعل ذلك في النهاية مما يؤدي الى اطلاق نبضة من الاشعاع ك.م بطول موجى $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ في الأنبوبة . وعند مرور هذه النبضة داخل الأنبوبة فانها تصادف ذرات نيون مستثارة فتعرضها لمجال ك.م متذبذب بتردد مطابق لتردد الضوء الذى يجب على الذرة المستثارة أن تبعثه . وهذا المجال المتذبذب فعال للغاية في جعل ذرة النيون المستثارة تهبط الى حالة أدنى ، وهي تفعل هذا بطريقة يكون فيها الفوتون الذى تطلقه ذو موجة متطاورة تماما مع الاشعاع الذى استثار الذرة حتى تبعث الفوتون .

عندما تنعكس هذه الموجات جيئة وذهابا بين طرفى الأنبوبة فانها تتراكم بشكل كبير نتيجة للموجات المطابقة التى تبعثها ذرات النيون الأخرى نتيجة استثارة هذه الموجات لها . وتبعاً لذلك تتواجد بالأنبوبة مجموعة قوية جداً من النبضات الموجية المتناسكة ذات الطول الموجى 6328 \AA ويغادر جانب صغير من هذا الاشعاع الأنبوبة خلال المرآة التى بها تسرب طفيف عند أحد أطراف الأنبوبة ، ويكون هذا هو شعاع الليزر . وعلى عكس ما يحدث في مصدر ضوئى عادى فان ذرات النيون كلها قد جمعت أشعاعها معا بحيث صارت كل الموجات متعاونة ، أى أن النبضات الموجية كلها يقوى بعضها البعض ويكون الشعاع الناتج شديدا جدا .

بالإضافة الى ذلك ، فان حقيقة انعكاس الشعاع جيئة وذهابا عددا كبيرا من المرات بين المرآتين المتوازيتين يجعل الأشعة الضوئية تخرج مستقيمة من طرف الأنبوبة . وإذا انفلت أحد الأشعة بعيدا عن محور الأنبوبة فانه يفقد من الجدران الجانبية أثناء الرحلات العديدة أماما وخلفا داخل الأنبوبة . ومن الأهمية بمكان أيضا كون الشعاع عبارة عن حزمة دقيقة . فعلى عكس الضوء الصادر من مصباح ، لا تنتشر الطاقة في الفضاء . وبدلاً من هذا تسرى في الفضاء خلال أسطوانة دقيقة وتحفظ بشدتها لمسافات طويلة جدا . فالليزر المين في الشكل (٢٧ - ٢٠) ، مثلاً ، تبلغ قدرته عند الخرج 0.0005 W فقط ، إلا أن الطاقة الضوئية محصورة في حزمة ضيقة بحيث أن الشعاع المعترض يفوق في الضياء المصابيح ذات الطاقة العالية التى تبدو في المنظر الأمامى . بل أن أشعة الليزر التى ترسل الى القمر ثم تنعكس الى الأرض مرة أخرى كثيراً ما تستخدم لعمل قياسات على ظهر القمر .

وقد تم استخدام أجهزة ليزر قوية ذات خرج يبلغ عدة واطات في كثير من التطبيقات في السنوات الأخيرة . ولاشك أنك تعرف باستخدامها في جراحات العيون وإزالة الأورام الخبيثة وكثير من التطبيقات الطبية المماثلة . ويقوم الجراحون الآن باستعمالها بشكل روتيني . وتستخدم الليزرات الأكبر قدره في لحام المعادن بواسطة الحرارة الهائلة التي تتولد عند إمتصاص الشعاع داخل المادة . ويمكن إضافة المزيد من التطبيقات التي تنمو قائمتها يوما بعد يوم ، فنقل المعلومات ، مثلاً ، عبر مسافات شاسعة بواسطة أشعة الليزر قد أصبح حقيقة واقعة في زمننا هذا . أما في البحث العلمي فقد أصبح الليزر الضوئي فعلاً من الأدوات النافعة . ومن الطريف أن ندرك أنه كان سيصبح من المستحيل تصور أو إدراك هذا المصدر الضوئي الهام بدون كمية المعلومات الأساسية عن الذرات ومستويات طاقتها وسلوكها والتي كدسها كثير من العلماء فوق ما يزيد على نصف قرن . أي أن هذا يعتبر مثلاً حياً على كيفية تأدية المعرفة المتزايدة عن الطبيعة إلى طرق أفضل لاستخدام قوانينها .

ملخص

يبلغ قطر الذرة حوالي 10^{-10} m وتتكون من نواة موجبة الشحنة قطرها حوالي 10^{-15} . إذا كانت الشحنة النووية هي $+Ze$ فإن هناك Z إلكترونات في ذلك الجزء من الذرة خارج النواة .

تبعث ذرات الأيدروجين المستثارة ضوءاً تشكل أطواله الموجية عدة متسلسلات للخطوط الطيفية . ويمكن تمثيل تلك المتسلسلات بالعلاقة $1/\lambda = R(1/p^2 - 1/n^2)$ ، حيث $n > p$ وكلاهما عدد صحيح . عندما تكون $p=1$ فإننا نجد متسلسلة ليمان في المدى فوق البنفسجي ، وعندما $p=2$ تنتج متسلسلة بالمر وهي تقع جزئياً في المدى المرئي من الطيف . أما حين تكون $p=3$ فإن متسلسلة باشن توجد في المدى دون الأحمر .

لقد استطاع بوهر أن يفسر طيف ذرة الأيدروجين بوضع الفروض التالية : يدور الإلكترون حول النواة في مدارات مستقرة معينة حيث لا تشع أية طاقة ، تعطى أنصاف أقطار هذه المدارات بشرط كمي تخضع له كمية التحرك الزاوي وهو $mvr_n = nh/2\pi$ ، تفقد الذرة طاقة عندما يهبط الإلكترون من مدار خارجي إلى آخر داخلي ، وتبعث هذه الطاقة على هيئة فوتون طاقته $h\nu$. كما أنه استطاع إثبات أن مستويات طاقة ذرة الأيدروجين تعطى بالعلاقة $E_n = 13.6/n^2$ eV .

يمكن للذرات أن تستثار إلى حالات أعلى للطاقة عن طريق التصادمات التي تقع عند درجات الحرارة العالية أو في تفريغ كهربى . كما أن الفوتونات الساقطة يمكنها أن تستثير الذرات بشرط أن تكون طاقة الفوتون مساوية تماماً للطاقة اللازمة لرفع الذرة إلى مستوى أعلى . تمتص ذرات الأيدروجين الأطوال الموجية في متسلسلة ليمان .

افترض دى بروي أن الإلكترون له طول موجى مصاحب يبلغ $\lambda = h/mv$ ويمكن تفسير مدارات بوهر على أنها مسارات رنين لموجات الإلكترون . وهذا التفسير يبرر الشرط الكمي الذى وضعه بوهر لكمية التحرك الزاوي .

تصوغ معادلة شرودنجر الطبيعية الموجية للجسيمات بطريقة كمية ، إذا أن حلها يدلنا على كيفية توزيع الإلكترونات داخل الذرات . وتدل أيضاً على أن المدارات الدائرية حسب بوهر صحيحة من الناحية الكيفية فقط ، يبين حل شرودنجر أن هناك أربعة أعداد كمية على درجة من الأهمية : n ، l ، m_l ، m_s . وهذه الأعداد يمكنها أن تتخذ القيم التالية : $n = 1, 2, 3, \dots$ ، $l = 0, 1, \dots, n-1$ ، $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ، $m_s = \pm \frac{1}{2}$.

يتأثر تركيب للذرات عديدة الالكترونات تأثيراً كبيراً بمبدأ باولى للاستبعاد الذى ينص على أنه لا يوجد الكترونا فى نفس الذرة ولهما نفس مجموعة الأعداد الكمية . ولذا لا يوجد فى القشرة $n = 1$ سوى الكترونين أما فى القشرة $n = 2$ فلا يوجد سوى ثمانية الكترونات وهكذا . ويؤثر التركيب القشرى للذرات تأثيراً ، بالغاً فى خواصها الكيميائية .

نتج أشعة X عندما تصطدم الكترونات عالية الطاقة جسيماً صلباً . تنبعث أشعة X المميزة من عناصر ذات Z عالية عندما تحدث الانتقالات الالكترونية فى القشرات الداخلية . تبعث الذرات الغازية أطيفاً خطية حين تكون ساخنة بينما تبعث الأجسام الصلبة والسوائل المتوهجة طيفاً مستمراً .

يقال لموجتين أنهما متماثلتان اذا كان لهما نفس الشكل وتحتفظان بنفس العلاقات الطورية. تؤدي الموجات المتماثلة الى تأثيرات للتداخل تستمر لفترات زمنية طويلة . يتكون الضوء العادى من نبضات موجية غير متماثلة . أما نبضات الموجات الضوئية لليزر فهي ليست فقط متماثلة وانما هي أيضا متطابقة مع بعضها البعض . ولهذا يمكن جعل تفرق الأشعة فيها صفراً .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام الفصل يجب أن تكون قادراً على عمل الآتى :

- ١ - أن تصف تجربة رذرفورد وتشرح كيف تؤدي الى مفهوم الذرة النووية .
- ٢ - أن تذكر القطر التقريبى للذرة .
- ٣ - أن ترسم ربما تخطيطياً لمتسلسلة بالمر وأن تكتب صيغة بالمر . أن تحسب الطول الموجى لخط معين من متسلسلة بالمر اذا أعطيت ثابت رايدبرج . وأن تكرر هذا بالنسبة لكل من متسلسلة ليمان ومتسلسلة باشن . أن تذكر أى المتسلسلات تقع جزئياً فى المنطقة المرئية .
- ٤ - أن تصف نموذج بوهر لذرة الأيدروجين وأن تعطى أثناء الوصف افتراضاته بالنسبة للمدارات المستقرة وابتعاث الضوء . أن تشرح على أساس هذا النموذج كيف تنتج المتسلسلات الطيفية المختلفة .
- ٥ - أن ترسم ربما بيانياً لمستويات الطاقة لذرة احادية الالكترون بسيطة عندما تعطى صيغ طاقاتها . أن تبين على الرسم البيانى لمستويات طاقة الأيدروجين كيف تنشأ المتسلسلات المختلفة .
- ٦ - أن تشرح لماذا تمتص ذرات الأيدروجين الأطوال الموجية لمتسلسلة ليمان بشكل طبيعى ولا تمتص تلك التى لمتسلسلة بالمر .
- ٧ - أن تصف كيف يمكن استخدام المفهوم الموجى لدى برولى لتفسير اختيار بوهر للمدارات المستقرة .
- ٨ - أن تشرح معنى الرسم البيانى للتوزيع الألكترونى كالذى فى الشكل (٢٧ - ١٤) .
- ٩ - أن تذكر نص قاعدة باولى للاستبعاد وأن توضح لماذا تتنبأ بأن الليثيوم أحادى التكافؤ .
- ١٠ - أن تشرح كيف تنتج أشعة X فى أنبوبة أشعة X . وأن تميز بين الأشعة المميزة وأشعة الفرملة . أن تحسب أقصر طول موجى لأشعة X يمكن أن ينبعث من هدف صدم بالكترونات ذات طاقة عالية معينة .
- ١١ - أن تميز بين الطيف الخطى والمستمر وأن تشير الى أنواع المصادر الضوئية لكل منها .
- ١٢ - أن تشرح الفرق بين الموجات المتماثلة وغير المتماثلة .
- ١٣ - أن تذكر السمات الأساسية لشعاع الليزر بالنسبة للتاسك ، الطور ، ونوعيته الدقيقة وأن تذكر كيف تؤدي هذه السمات الى الاستخدامات التخصصية لليزر .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تكون قادراً على تعريف أو شرح كل من :

الذرة النووية

المتسلسلة الطيفية ، حد المتسلسلة

متسلسلات ليمان وبالمر وباشن

ذرة بوهر وفروضه

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

الرسم البياني لمستويات الطاقة .

طاقة التأين ، الحالة الأرضية

مبدأ باولي للاستبعاد

القشرات الذرية

أشعة - α المميزة ، أشعة الفرملة

الطيف الخطي ، الطيف المستمر .

الموجات والأشعة المتناسكة

الليزر

أسئلة وتخمينات

- ١ - لماذا لا يتوهج غاز الأيدروجين الذى يحضره الطلاب فى المعمل ولا يصدر ضوءا ؟
- ٢ - أعطيت أنبوبة بداخلها قطبان ومقفلة جيدا عند طرفيها وكان الغاز الذى تحتوى هو إما أيدروجين أو هليوم . كيف يمكن تحديد نوع الغاز دون أن تكسر الأنبوبة ؟ اذا كان الغاز تحت ضغط مرتفع فما هى الصعوبات التى قد تعترضك ؟
- ٣ - يمتص غاز الأيدروجين عند درجة حرارة الغرفة ضوءا ذا طول موجى يناظر خطوط متسلسلة ليمان ولكنه لا يمتص أطوالا موجية من متسلسلة بالمر . لم لا ؟
- ٤ - عندما يمر ضوء أبيض خلال وعاء يحتوى على غاز الأيدروجين فإنه يلاحظ أن أطوالا موجية من متسلسلة بالمر وكذا متسلسلة ليمان يتم امتصاصها ونستنتج من هذا أن الغاز ساخن جدا . لم استنتجنا هذا الاستنتاج ؟ (هذا هو فى الواقع الأساس لاحدى طرق قياس درجة حرارة غاز ساخن) .
- ٥ - تكون الخطوط الطيفية المبعثة من قوس متكون فى غاز الأيدروجين تحت ضغط منخفض جدا - أكثر حدة بكثير من تلك الخطوط المتكونة فى أنبوبة تفريغ عند ضغط عال . أشرح .
- ٦ - أشرح بوضوح لماذا لا تشاهد خطوط انبعاث أشعة α فى المدى 1\AA وذلك اذا صدرت أنبوبة أشعة α تستخدم كهدف فى الأنبوبة معدنا عدده الذرى منخفض .
- ٧ - لماذا تصدر الأجسام الصلبة الساخنة طيفا مستمرا بينما تصدر الغازات الساخنة طيفا خطيا ؟
- ٨ - تشك احدى شركات الصلب فى أن احدى منافساتها تضيف الى منتجاتها (منتجات الشركة المنافسة) كسرا صغيرا من النسبة المئوية من عنصر أرضى نادر . كيف يمكن تحديد هوية العنصر ومعرفة تركيزه بسرعة ؟
- ٩ - هناك شك فى أن كمية معينة من البنزين تحتوى على أثر ضئيل من الاسيتون كشائبة . ما هى الطرق العملية الموجودة لاختبار صحة هذا الشك ؟
- ١٠ - فى ذرة الهليوم يكون الالكترونات على نفس القشرة ولكن كل منهما يتجنب الآخر بدرجة كافية بحيث يكون التفاعل بينهما ذا درجة ثانوية من الأهمية . قدّر قيمة طاقة التأين (بالالكترون فولت) للهليوم أى الطاقة اللازمة لاطلاق سراح أحد الالكترونين وقدّر أيضا الطاقة اللازمة لاطلاق سراح الالكترون الثانى . أى هاتين القيمتين موثوق بها أكثر ؟ (ق)
- ١١ - تبلغ قيمة طاقة التأين للثيموم ، الصوديوم والبوتاسيوم القيم التالية على الترتيب ، 5.4 و 5.1 و 4.3 eV بينما هى للهليوم والنيون والارجون 24.6 و 21.6 و 15.8 eV على الترتيب . اشرح فى اطار التركيب الذرى لماذا كانت هذه القيم متوقعة ؟
- ١٢ - قدّر قيمة طاقة الفوتون القادر على اقتلاع الكترون من أقصى قشرة داخلية لذرة الذهب (ق) .
- ١٣ - يبلغ قطر النواة حوالى 10^{-15} m . قدّر قيمة الحد الأدنى لكمية تحرك بروتون عليه أن يكون جزءا من النواة . (ق)

مسائل

*١ - قذف رذرفورد ومساعدوه جسيمات α ($q = +2e$) نحو ذرات الذهب ($Z = 79$) وقد كانت ط. ح لبعض الجسيمات هي 4.8 MeV . (أ) ما هي ط.و. (بدلالة r) لجسم α موجود على مسافة r من نواة الذهب ؟ (ب) الى أى حد يمكن لجسيمات α في تجربة رذرفورد أن تقترب من مركز نواة الذهب ؟ افترض أن نواة الذهب تبقى ساكنة بالضرورة وأهمل تأثير الإلكترونات الذرية (البعيدة نسبياً) .

*٢ - تبلغ كثافة الذهب 19.3 g/cm^3 ووزنه الذري 197 (أ) ما هو وزن ذرة الذهب ؟ (ب) ما عدد ذرات الذهب في مساحة قدرها 1 cm^2 من غشاء ذهبي سمكه 0.010 cm ؟ (ج) يبلغ قطر نواة الذهب حوالي 10^{-14} cm بافتراض عدم وجود تراكب ، فما هي المساحة التي يغطيها نوى الذهب من المساحة الكلية 1 cm^2 ؟ (د) لو أن رذرفورد استعمل غشاء بهذا السمك فما هو كسر جسيمات α الذى سيلتصق أنه أنحرف بشدة ؟

*٣ - احسب الطول الموجى (أ) للخط الرابع في متسلسلة ليمان و (ب) للخط الخامس في متسلسلة بالمر . (استعمل $R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$)

*٤ - تأكد من حد المتسلسلة المعطى لمتسلسلة باشن في الشكل (٢٧ - ٥) وذلك بحسابه من صيغة متسلسلة باشن استخدم $R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

*٥ - اعتبر ان $\Delta\lambda$ هو الفرق في الطول الموجى بين الخط السابع في متسلسلة بالمر وحد المتسلسلة ما هي النسبة بين $\Delta\lambda$ والطول الموجى لحد المتسلسلة . استخدم $R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

*٦ - (أ) ما هي صيغة مستويات الطاقة لليثيوم ثنائى التأين والمكتوبة بالشكل الآتى $E_n = -\text{const}/n^2 \text{ eV}$ (ب) ما هي الطاقة اللازمة (بالالكترون فولت) لازالة آخر الكترون من الليثيوم ثنائى التأين ؟ (ج) ما هو الطول الموجى لفوتون يقدر بالضبط على اطلاق هذا الألكترون حرا ؟

*٧ - افترض أن الكترونا يدور في مسار دائرى نصف قطره 0.1 nm حول نواة الأيدروجين . (أ) ما هي سرعة الالكترون اذا كانت قوة الجذب المركزى سببها قوى كولوم ؟ (ب) ما هو تردد الالكترون في المدار ؟ (ج) ما هو الطول الموجى للأشعاع الناتج عن هذا على أساس النظرية الكلاسيكية .

*٨ - افترض أن نظرية بوهر يمكن تطبيقها على الالكترون الداخلى جدا في ذرة الذهب ($Z = 79$) . وذلك مع اهمال وجود جميع الالكترونات الأخرى (و هذا في الواقع ليس بالتقريب الرديء) . (أ) أثبت أن الطاقة اللازمة لازالة هذا الالكترون من الذرة هي $(13.6)(79)^2 \text{ eV}$ (ب) ما هو نصف قطر أول مدار - حسب بوهر - لهذه الذرة ؟

*٩ - تتكون قشرة ذرية فرعية من تلك الالكترونات الذرية التى لها نفس قيم n و l وتختلف في m_l و m_s . كم عدد الالكترونات الموجودة في القشرة الفرعية $n=3$ ، $l=2$ لذرة الذهب ؟

*١٠ - كم عدد الالكترونات اللازمة للملأ (أ) القشرة $n=4$ و (ب) القشرة الفرعية $n=3$ و $l=1$ ؟ (أنظر المسألة رقم ٩ لتراجع تعريف القشرة الفرعية) .

*١١ - معجل الشعاع الالكترونى في أجهزة التليفزيون الملون الحديثة عادة خلال ما يقرب من $20,000 \text{ V}$. ما هو أقصر طول موجى لأشعة x المتولدة بشعاع معجل بهذه القيمة $20,000 \text{ V}$ حين يصطدم بنهاية أنبوبة التليفزيون ؟ لم تكن بعض الأجهزة القديمة للتليفزيون على درجة كافية من الوقاية ولذا كانت تتسرب منها كميات محسوسة من أشعة x .

*١٢ - يسطع شعاع من أشعة γ طولها الموجى 0.5 \AA على ذرات من غاز الأيدروجين ويقوم باقتلاع الكترونات (الكترونات كهروضوئية) من ذرات الأيدروجين .

(أ) ما هي طاقة الالكترونات المقتلعة ؟ (ب) وما هي سرعتها ؟

*١٣ - يمكن تشغيل أنبوبة عادية لأشعة x بجهد قدره $30,000 \text{ V}$ وتيار قدره 10 mA بقذف اللوح . (أ) ما هي كمية الحرارة الناتجة في اللوح في الثانية نتيجة هذا القذف ؟ (ب) لو كانت الحرارة النوعية هي 0.1 cal/g للوح المعدنى الذى وزنه 200 g ، فما هو الارتفاع الناتج في درجة الحرارة في زمن قدره 1 min اذا لم تفقد أية حرارة ؟

- ١٤* - يستخدم في بعض أنابيب أشعة x ذات الطاقة العالية جدا ، ماء يسرى خلال باطنى اللوح المعدنى لتبريده . افترض أن أنبوبة معينة تعمل عند تيار قدره 30 mA و 200,000V . ما هى درجة تسخين ماء التبريد اذا كان معدل السريان هو 1 litre/min ؟
- ١٥* - يقذف غاز الأيدروجين عند درجة حرارة الغرفة بشعاع من الالكترونات التى سبق تعجيلها خلال فرق للجهد قدره 12.9 v ما هو الطول الموجى للضوء الذى يبعثه الغاز نتيجة لهذا القذف ؟
- ١٦ - يبلغ حد المتسلسلة فى حالة متسلسلة معينة لأشعة X فى النحاس حوالى 1.3\AA . ما هى الطاقة اللازمة لاقتلاع الالكترون من الذرة عندما يكون الالكترون فى أدنى مستويات الطاقة لهذه المتسلسلة ؟
- ١٧ - (أ) عين باستخدام البيانات الواردة فى الشكل (٢٧ - ١٦) فرق الطاقة بين المستويين $n=2$ و $n=3$ للموليبدينم . (ب) لو أنك أردت تشييد الرسم البيانى لمستويات الطاقة لهذه الذرة ما هى البيانات الاضافية اللازمة لذلك ؟
- ١٨ - قد تستغرق ذرة ما زمنا قدره 10^{-9} s لتبعث فوتونا . افترض أن الذرة تبعث نبضة موجية خلال هذا الزمن بحيث كان الطرف الأمامى للنبضة قد ابتعث مبكرا بمقدار 10^{-9} s عن الطرف الخلفى لها . ولو أن الطول الموجى للموجة كان 500 nm فما هو طول الفوتون مقدرا بالأطوال الموجية ؟
- ١٩** - يكون شعاعا ليزر مختلفين متماسكين لو أن كل ليزر يبعث نفس الأطوال الموجية تماما . وحتى لو كان هناك اختلاف طفيف فى الأطوال الموجية فإن الشعاعين سيظهرا أثر التداخل . وعندما يوصل الشعاعان معا فإنهما يعطيان شعاعا هو المحصلة ويتذبذب مع الزمن جيئة وذهابا من الاضاءة الى الظلمة . وهذا شبيه بظاهرة الخفقات التى نوقشت فى الفصل الخامس عشر للموجات الصوتية . لو أن الطول الموجى لأحد الشعاعين كان 600nm تماما فكم يكون الطول الموجى للآخر حتى يمكن انتاج أقصى اضاءة مرة كل ثانية ؟ (قد تهد أن تستخدم حقيقة أنه عندما $x \ll 1$ فإن $1/(1 \pm x) \approx 1 \mp x$)

الفصل الثامن والعشرون

النواة الذرية

لقد أوضحت تجربة رذرفورد - كما رأينا في الفصل السابق - أن النواة الذرية هي كيان صغير جدا في مركز الذرة يتركز داخله كل الشحنة الموجبة للذرة وكذلك معظم كتلتها . أما في هذا الفصل فسنقصي تفاصيل النواة وسنتعرف كذلك على بعض خواص أخرى للنواة مثل النشاط الإشعاعي والانشطار والاندماج . كما سنقدم أيضا عددا من التطبيقات المختلفة للفيزياء النووية .

٢٨ - ١ تركيب النواة

رأينا في الفصل السابق كيف استطاع رذرفورد أن يستدل على تركيب الذرة من نتائج تجارب الاستطارة . ومنذ ذلك الحين كان النموذج النوى للذرة يلقي كثيرا من التأكيدات بطرق عديدة . ومن ثم صار تصورنا للذرة كما يلي : نواة دقيقة عند مركز الذرة يوجد عندها كل الشحنة الموجبة للذرة كما يوجد بها أكثر من 99.9 في المائة من كتلتها . أما الذرة نفسها فنصف قطرها أكبر بحوالى 10^5 مرة من نصف قطر النواة . أما الالكترونات فتوجد في الجزء الخارجى للذرة . وقد تمت في الفصل السابق مناقشة سلوك الالكترونات والآن ننتقل إلى مناقشة النواة الذرية .

تتكون النواة من نيوترونات (n) وبروتونات (p) . وكما تعلمنا من قبل فالبروتون هو ببساطة نواة ذرة الهيدروجين وشحنته $+e$ وتساوى $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ وكتلته هي $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$. أما النيوترون فلا شحنة له وكتلته هي $1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$. سنقوم كثيرا باستخدام وحدة للكتلة أسهل تداولاً تسمى وحدة الكتلة الذرية u وسنعرف فيما بعد التعريف الدقيق لها . تبلغ كتلة البروتون $1.007 u$ أما كتلة النيوترون فهي $1.009 u$ وفي كثير من الأغراض سنقرب هذه الكتل إلى الواحد الصحيح .

حيث أن شحنة النواة هي Ze لعنصر عدده الذرى Z ، لذا نجد أن هناك Z بروتون في النواة . وهذه البروتونات تقدم Z وحدة للكتلة (بوحدات الكتلة الذرية) إلى النواة على أن الكتلة M لأية نواة تربو على Z لجميع العناصر فيما عد الهيدروجين ، ويعزى هذا الفرق في الكتلة إلى النيوترونات التى بالنواة . ويشير إلى النيوترونات والبروتونات الموجودة بالنواة على أنها نويات ، ويسمى العدد الكلى للنويات داخل النواة بعدد الكتلة الذرية للعنصر مثار السؤال ويمثل بالرمز A . ولما كانت كتل البروتون والنيوترون قريبة من الواحد الصحيح ($1 u$) فإن قيمة A ستكون قريبة من كتلة النواة مقاسة بوحدات الكتلة الذرية .

العدد الكلى
 A

يمكن قياس حجم النواة عن طريق قذفها بجسيمات ذات طاقة عالية . وقد بينت هذه القياسات أنه يمكن اعتبار النواة كرة بشيء من التقدير التقريبى ويكون نصف قطرها R معطى بالعلاقة .

$$R = (1.2 \times 10^{-15})(A^{1/3}) \text{ m}$$

نصف قطر
النواة

ومن المنطقي أن يتغير نصف القطر النووي مع $A^{1/3}$ وذلك لأن كتلة النواة تتناسب مع الكتلة الذرية للعنصر ، فإذا افترضنا أن نويات كافة العناصر لها نفس الكثافة ρ فإن ،

$$A \propto \text{الكتلة} = \rho \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right)$$

ومن هنا نجد أن ،

$$R \propto A^{1/3}$$

وتغير R بهذه الطريقة - على الأقل بالنسبة للنوى الكبير ، يدل على أن نوى العناصر له نفس الكثافة .

لنعد الآن إلى أبسط الذرات على الإطلاق وهو الهيدروجين . لقد أشرنا إلى أن عدده الكتلي واحد صحيح ، وأن نواته هي ببساطة البروتون . ولدواعي السهولة سنستخدم عادة الوحدات الذرية للتعبير عن الكتل الذرية ، وتعتبر عن الشحنات على أنها مضاعفات لكم الشحنة $+e$. ومن ثم تكون كتلة نواة الهيدروجين هي وحدة الكتل وشحنتها وحدة الشحنات .

الذرة التي تلي الهيدروجين في الجدول الدوري * ، وهي للعنصر التالي في الثقل وهو الهليوم . للهليوم إلكترونان خارج نواته وهو غاز خامل كيميائياً . وحيث أن شحنة النواة يجب أن تتوازن تماماً مع الشحنة الالكترونية ، لذا فنواة الهليوم يجب أن تحمل شحنة مقدارها $+2$. يشير مطياف الكتلة (سيناقش في القسم القادم) إلى أن كتلة نواة الهليوم قريبة جداً من $4u$ ، أى أن نوى الهليوم يجب أن يحتوي على بروتونين ليتم توفير الشحنة $+2$ على كل نواة . أما الوجدتان الأخريان لكتلة النواة فمردهما إلى النيوترونين المكونين لباقي النواة . ومن ثم ، نجد أن وحدتي الشحنة الموجبه وأثنين من الوحدات الاربعة للكتلة في نواة الهليوم قد أسهم بهم البروتونان أما وحدتا الكتلة المتبقيتان فهما نتيجة للنيوترونين .

كلما تقدمنا في الجدول الدوري سوف نرى أن كل النوى يمكن أن ينظر اليه على أنه مكون من بروتونات ونيوترونات ، والمصطلحات التالية تستخدم كطريقة مختزلة لوصف النواة ، فتوصف نواة عنصر ما ، X مثلاً بالرموز التالية

رمز النواة

$\frac{A}{Z}X$ أو الكتلة الشحنة X

* أنظر الملاحق ٣ و ٤ للجدول الدوري والجدول النظائر .

ومعنى هذا أن الايدروجين سيرمز اليه بالرمز ^1_1H والهليوم ^4_2He . والذي يحدد الشحنة هو نفسه العدد الذرى Z لأنه كما تذكر من الكيمياء ترتب الذرات فى الجدول الدورى بدلالة عدد الالكترونات التى فى الذرة .

سنختار الآن اليورانيوم كمثال على عنصر ثقيل من الجدول الدورى . كل ذرة من ذرات اليورانيوم تحمل نواتها شحنة مقدارها 92 . ولذا يرتب اليورانيوم فى الجدول الدورى على أنه العنصر رقم 92 . (لاحظ أن طبيعة العنصر تحددها فاعليته الكيميائية وهذه بدورها تتحدد بالتركيب الالكترونى لذرة . ومن ثم يعنى الكيميائى بالشحنة التى على النواة فقط لأنها هى التى تحدد عدد الالكترونات المتاحة للذرة فى التفاعلات الكيميائية) وكما سنرى فى القسم القادم ليست كل النوى لعنصر ما بنفس الكتلة . ومع هذا فلنعتبر اليورانيوم 238 ، حيث لنواة اليورانيوم كتلة مقدارها 238 u وعلينا أن نرمز لهذه النواة بالرمز $^{238}_{92}\text{U}$.

يجب أن يكون واضحاً من هذا الرمز أن النواة تحوى 92 بروتونا توفر شحنة قدرها 92+ كما توفر 92 وحدة كتلة من المجموع الكلى وهو 238 وحدة . أما المتبقى وهو $238 - 92 = 146$ وحدة كتلة فتوفرها النيوترونات ، ومن ثم فنواة $^{238}_{92}\text{U}$ تحتوى على 92 بروتونا و 146 نيوترونا .

٢٨ - ٢ النظائر

لقد فكر الباحثون الأوائل فى أن الكتل النووية يجب أن تكون مضاعفات صحيحة لكتلة الايدروجين ، ولكن بمرور الزمن أشارت القياسات الدقيقة للكتل الذرية أن هذا ليس صحيحاً ، وعلينا أن نفهم أن الكتلة الذرية (وهى تقريبا الكتلة النووية ، لأن كتلة الالكترونات صغيرة جداً) قد تم تعيينها أولاً على يد الكيميائيين . فلو اتحد 1 g من الايدروجين ، مثلاً ، مع 35 g من الكلور لكى يكونا 36 g من كلوريد الايدروجين ، HCl ، لدعا ذلك الكيميائى إلى التفكير بأن ذرة الكلور ذات كتلة أكبر 35 مرة قدر ذرة الايدروجين . ومن ثم تعين الكتل الذرية فى الجدول الدورى بهذه الطريقة فى أغلب الأحوال . (اختار الكيميائيون ، فى الواقع ، الأوكسجين - لعدة سنوات - لكى تكون كتلته 16 u تماماً وبنوا على هذا الأساس كتل كل العناصر الأخرى . وقد أصبح من المتفق عليه الآن بناء كل الكتل على عنصر قياسى آخر وهو ^{12}C . وفى هذا النظام الموحد تكون كتلة ذرة ^{12}C بما فى ذلك الالكترونات هى - حسب التعريف - مساوية 12 u تماماً . وقد اتضح أن $1\text{ u} = 1.6606 \times 10^{-27}\text{ kg}$ وتبلغ كتلة البروتون فى هذا النظام للوحدات 1.0073 u .

وحدة الكتلة
الذرية

على أنه حين صارت القياسات أكثر دقة ، صار من الواضح أن الكتلة الذرية ليست مضاعفات صحيحة لكتلة الأيدروجين . فكتلة الكلور على سبيل المثال $35.5 u$ وهى بعيدة عن كونها عددا صحيحا . وعلى الرغم من أن العناصر ذات الأعداد الذرية المنخفضة تكون كتلتها أقرب ما تكون إلى الأعداد الصحيحة إلا أنه حتى البورون وهو العنصر رقم 5 تبلغ كتلته الذرية $10.8 u$ وهى ليست بالتأكيد عددا صحيحا من كتل البروتونات والنيوترونات . وقد سبب هذا الأمر قدرا كبيرا من الصعوبة في تفسير التركيب النووي ولم يتيسر حل هذه الصعوبة إلا باكتشاف مطياف الكتلة .

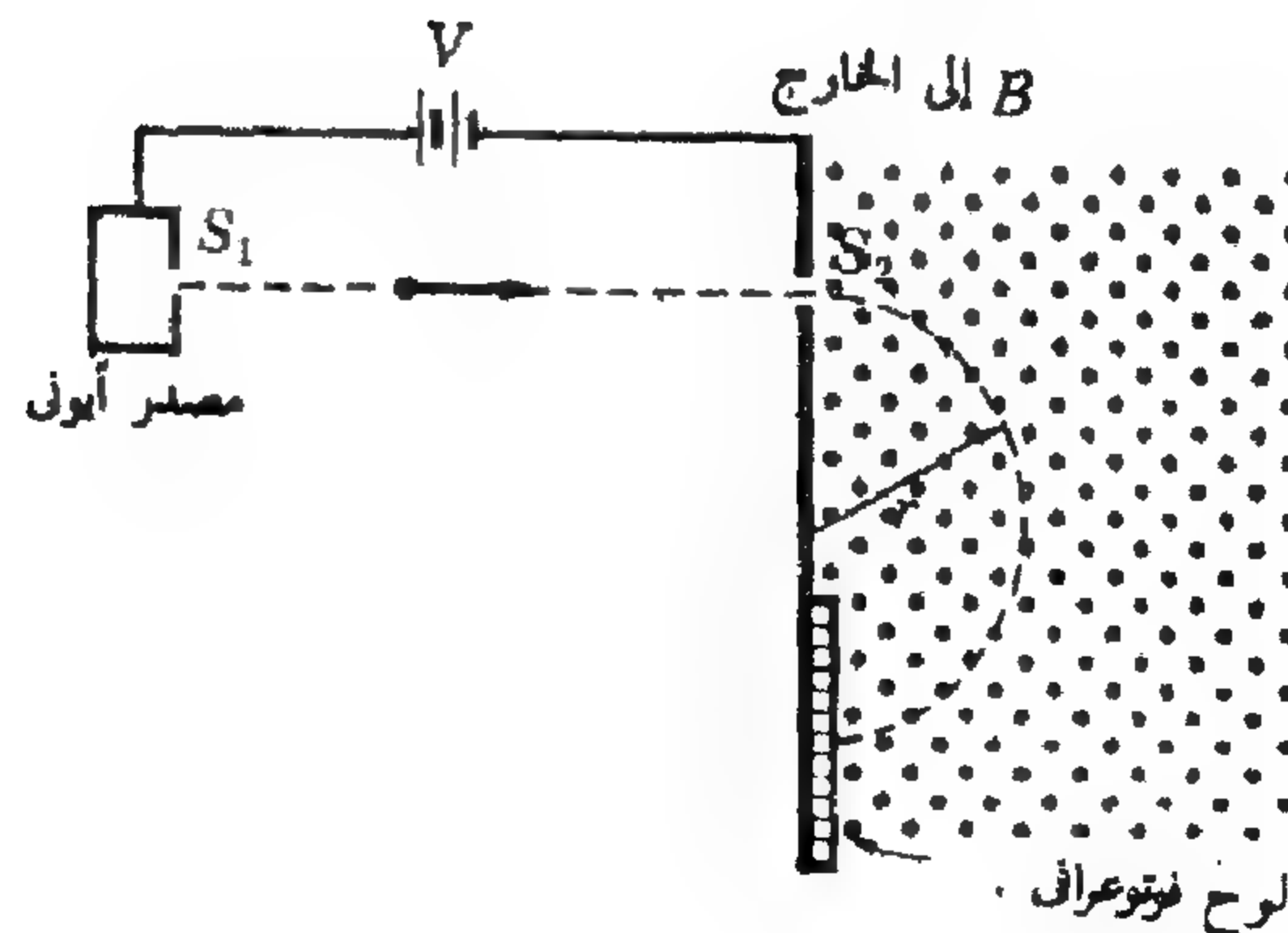
مطياف الكتلة

يتركب مطياف الكتلة كما في الشكل (٢٨ - ١) . تؤين الذرات في مصدر أيوني . وعندما يشرد أيون موجب من خلال الشق S_1 فإنه ينجذب نحو اللوح السالب والشق S_2 ، فلو كان أيونا وحيد الشحنة فإن شحنته تكون $+e$ وعند بلوغ الشق S_2 تكون طاقة حركته Ve ، حيث V هو فرق الجهد الذى ينحدر خلاله الأيون ، ومن ثم يكون لدينا

$$\frac{1}{2}mv^2 = Ve \quad (٢٨ - ١)$$

عندما يمر الأيون خلال الشق 2 ، فإنه يلج في مجال مغناطيسى عمودى على الصفحة . ينحرف الأيون في مسار دائرى ، كما هو مبين . ويمكن إيجاد نصف قطر المسار - كما سبق وناقشنا في الفصل التاسع عشر - من حقيقة أن القوى الجاذبة المركزية تتوفر من القوة المغناطيسية المؤثرة على الأيون ،

$$Bev = \frac{mv^2}{r} \quad (٢٨ - ٢)$$



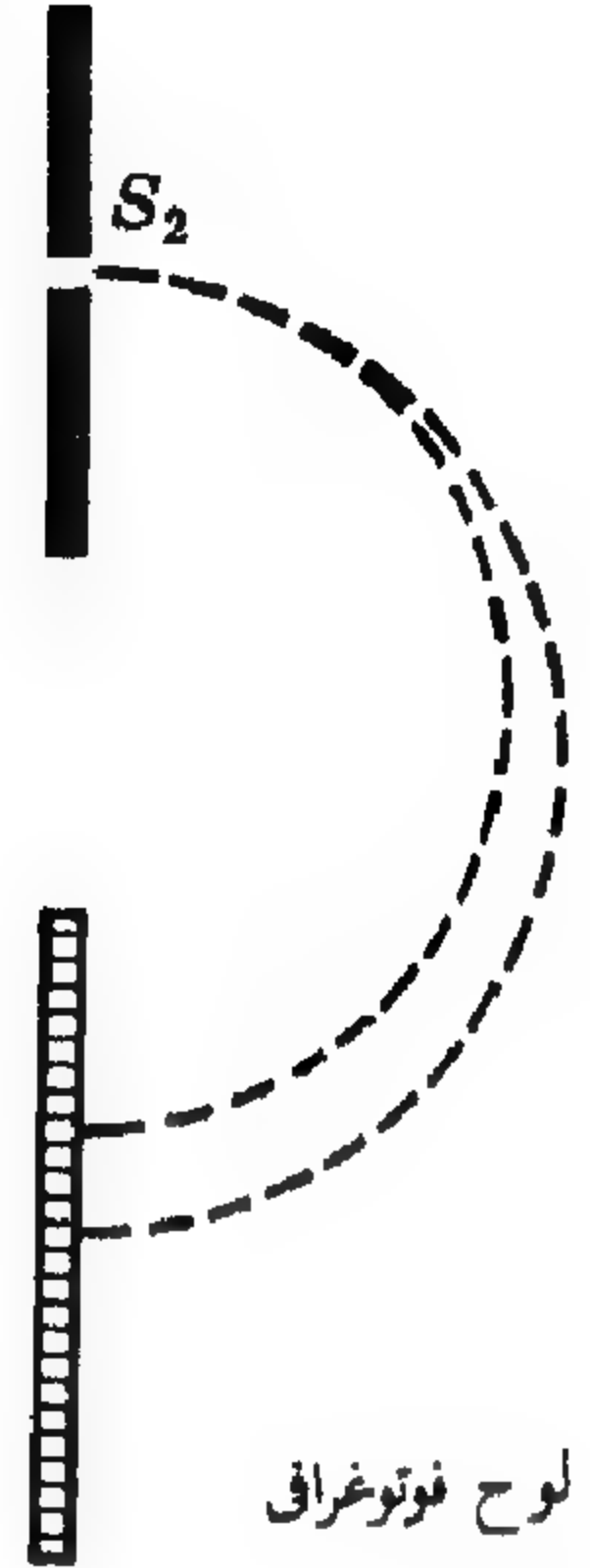
شكل (٢٨ - ١)
تنحرف الأيونات الموجبة في
مطياف الكتلة بواسطة المجال
المغناطيسى

بالتعويض من المعادلة (٢٨ - ١) في (٢٨ - ٢) نصل إلى التعبير التالي لنصف قطر المسار الدائري .

$$r = \sqrt{\frac{2Vm}{B^2e}} \quad (٢٨ - ٣)$$

وحيث أن الأيون سيتم اكتشافه بواسطة اللوح الفوتوغرافي المبين في الشكل (٢٨ - ١) ، لذا يمكن قياس r ، ومن الطبيعي أن قيم كل من V ، B ، e معروفة ، ومن ثم يمكن إيجاد كتلة الأيون . وتستخدم معظم المطاييف الحديثة كشفا الكترونيا بدلا من اللوح الفوتوغرافي .

حين بدأ تشغيل مطياف الكتلة ، ظهر اكتشاف طريف جدا ، فقد وجد أن عددا من العناصر التي على درجة عالية من النقاء تبدو كما لو كانت مكونة من عدة فصائل تتفق جميعا في نفس الخواص الكيميائية . فالكالور النقي ، مثلا ، وجد أنه يتكون من نوعين من الأيونات ، إذ وجد شعاعان أيونيان منفصلان في مطياف الكتلة كما هو موضح في الشكل (٢٨ - ٢) وبالتعويض عن قيم أنصاف الأقطار في المعادلة (٢٨ - ٣) أمكن حساب كتلتى النوعين . وبالإضافة إلى ذلك استخدمت درجة سطوع الصورة على اللوح الفوتوغرافي لتحديد الكثرة النسبية للنوعين .



شكل (٢٨ - ٢)
يسلك النظيران المختلفان
للكالور مسارات مختلفة في
مطياف الكتلة كما هو مبين
هنا (بشيء من المبالغة) .

النوع ٢	النوع ١	
37.0	35.0	الكتلة u
0.246	0.754	الكثرة النسبية

إذا ما أخذنا متوسط كتلة هاتين الفصيلتين (وذلك بضرب كل كتلة في الكثرة النسبية المناظرة ثم الجمع) ، فإننا نحصل على متوسط للكتلة مقداره $u = 35.5$ ، وهذا هو بالضبط المقدار الذى عينه الكيميائيون لكتلة الكالور . نستنتج من هذا أن الكتل الذرية المدرجة في الجدول الدورى هي متوسطات كتل الفصائل المنفردة .

من هنا نجد أن الكتل التي تعين بواسطة مطياف الكتلة للفصائل المنفردة تكون بالضرورة أعدادا صحيحة . وقد ثبتت صحة هذا الأمر لكل العناصر التي فحصت بهذه الطريقة . وحيث أننا نعلم أن كل أنواع الكالور لها شحنة نووية مقدارها 17 (لأن العدد الذرى للكالور هو 17) لذا وجب أن تحتوى نواة الكالور على 17 بروتونا ، ونستنتج من ثم أن نواة الفصيلة 1 المذكورة تحتوى على $(35-17=18)$ نيوترونا أما الفصيلة 2 فتحتوى على 20 نيوترونا . يسمى النوى الخاص بنفس العنصر والذى يحتوى على اعداد مختلفة من النيوترونات نظائر العنصر . وفي اطار هذا المصطلح يحتوى الكالور الموجود في الطبيعة على نظيرين يسميان $^{35}_{17}\text{Cl}$ و $^{37}_{17}\text{Cl}$.

تتصرف جميع النظائر لعنصر ما بنفس الطريقة في التفاعلات الكيميائية . وهذا راجع إلى حقيقة أن جميع النظائر لها نفس الشحنة النووية ، وتبعاً لذلك نفس العدد من الإلكترونات في ذراتها . والكتلة الذرية لكل نظير قريبة جداً من عدد صحيح ، لأن نواته مبنية من نيوترونات وبروتونات لكل منها وحدة الكتلة . ومعظم العناصر الموجودة في الطبيعة هي خليط من نظائر مختلفة وهذه الخليط هي التي تستخدم عادة في التفاعلات الكيميائية العادية . أما الكتلة الذرية المعينة كيميائياً للعناصر التي في الجدول الدوري فهي ليست أعداداً صحيحة لأنها متوسط الكتل النظائرية الموجودة في الطبيعة . وستجد في الملحق رقم ٤ قائمة مختصرة للنظائر الموجودة في الطبيعة .

٢٨ - ٣ النقص الكتلي وطاقة الترابط

باختراع مطاييف الكتلة ذات الحساسية الفائقة أمكن تعيين كتل النوى بدقة كبيرة . وقد وفرت هذه النتائج الدقيقة للغاية تأييداً مذهلاً لمفهوم أينشتاين عن تبادل الكتلة - الطاقة . فقد بينت هذه القياسات بالفعل ، إمكانية استخدام الطاقة النووية وهي مصدر للطاقة لم يكن من قبل موضع مجرد الشك . ويمكننا معرفة قيمة المبدأ المتضمن بفحص موقف محدد .

لندرس حالة بسيطة وذلك بتحليل بيانات الكتلة لنواة الهليوم . يجب أن تتكون كتلتها الكلية من كتلة بروتونين زائد كتلة نيوترونين ،

$$2n = 2.01734 \text{ u}$$

$$2p = 2.01456$$

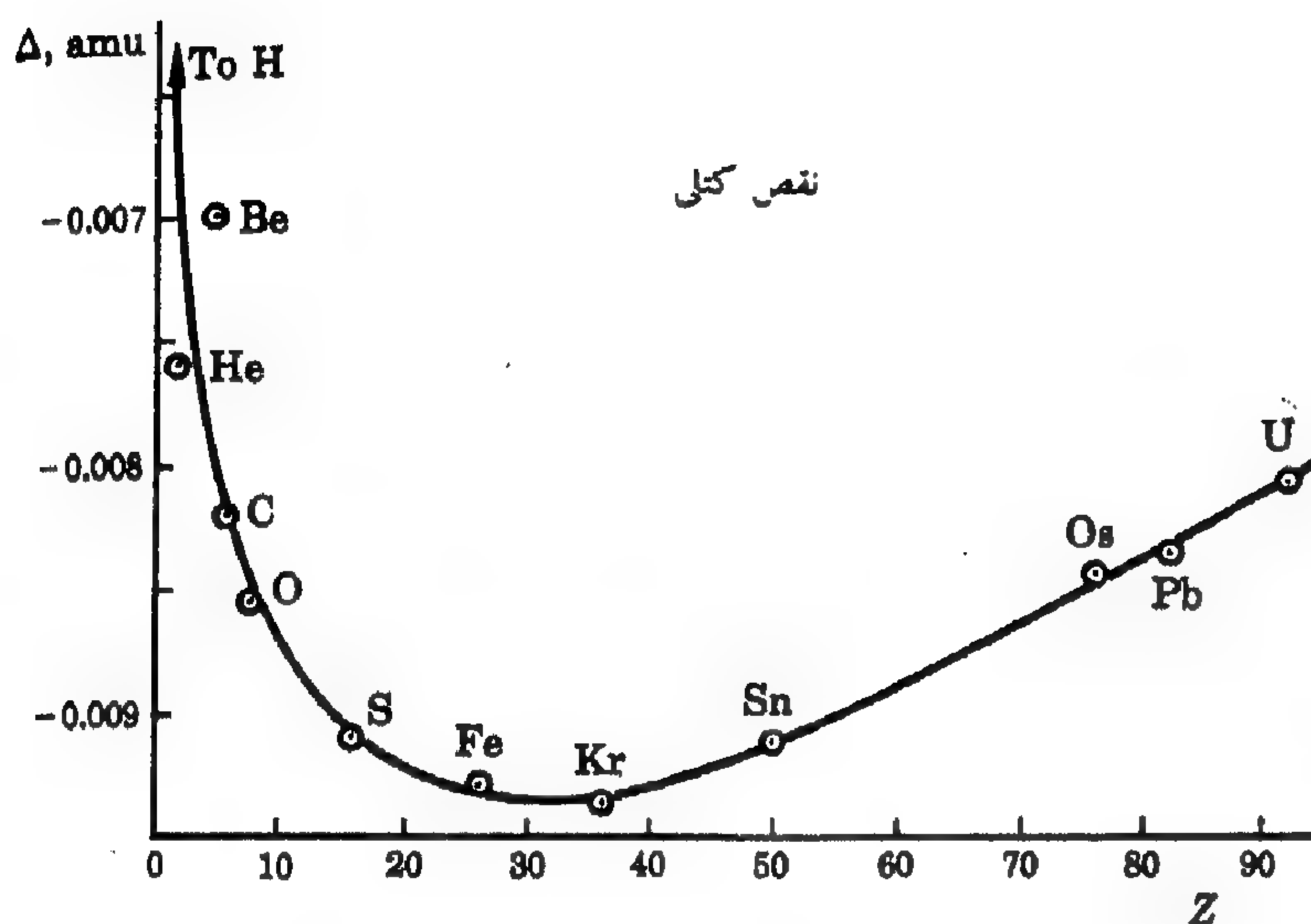
$$\text{كتلة He المحسوبة} = 4.03190$$

$$\text{كتلة He المقاسة} = 4.00150$$

$$\text{الفرق في الكتلة} = 0.03040 \text{ u}$$

من الواضح أنه لا يوجد اتفاق بين الكتلة المقاسة والكتلة المحسوبة . وأن الاختلاف وهو 0.030 u أكبر من أن يعزى إلى الخطأ التجريبي . فأين إذن يذهب هذا الفائض من الكتلة حين تتحد البروتونات والنيوترونات لتكوين النواة ؟ هذا ماسنحاول الآن بحله .

وهذا الاختلاف في حالة الهليوم ليس هو الوحيد ، إذا تحدثت اختلافات مشابهة للنوى المختلفة كذلك كما يصور الشكل (٢٨ - ٣) ، حيث يبدو الرسم البياني بين تغير الكتلة لكل نوية $\Delta M/A = (M - M_{np})/A$ والعدد الذري . ونعني بتغير الكتلة لكل نوية الكتلة النووية الحقيقية M مطروحا منها مجموع كتل البروتونات والنيوترونات M_{np} وقسمة الناتج على العدد الكلي للنيوترونات والبروتونات A . ومن الطبيعي أن ΔM تكون صفرا في حالة الايدروجين وهي تقع خارج حدود المنحنى من أعلا في الشكل ٢٨ - ٣ .



شكل (٢٨ - ٣)
اختلاف الكتلة لكل نوية
للنوى القريب من منتصف
الجدول الدوري يكون أكبر
من ذلك الذي للعناصر
الواقعة عند طرفي الجدول
الدوري .

أننا نعلم طريقة واحدة فقط يمكن أن تفقد بها الكتلة في موقف كهذا . لقد وجدنا في الفصل السادس والعشرين أن الكتلة يمكن أن تتحول إلى طاقة وأن العلاقة بينهما هي ،

$$\Delta m c^2 = \text{الطاقة} \quad (٢٨ - ٤)$$

حيث Δm هي الكتلة المفقودة و c سرعة الضوء 3×10^8 m/s. ويتضح من ثم أنه عندما يتحد النيوترونات والبروتونات لتكوين نواة الهليوم فإن قدرا من الطاقة يجب أن يخرج . وهذا القدر من الطاقة يرتبط مع فقد الكتلة بالمعادلة (٢٨ - ٤) .

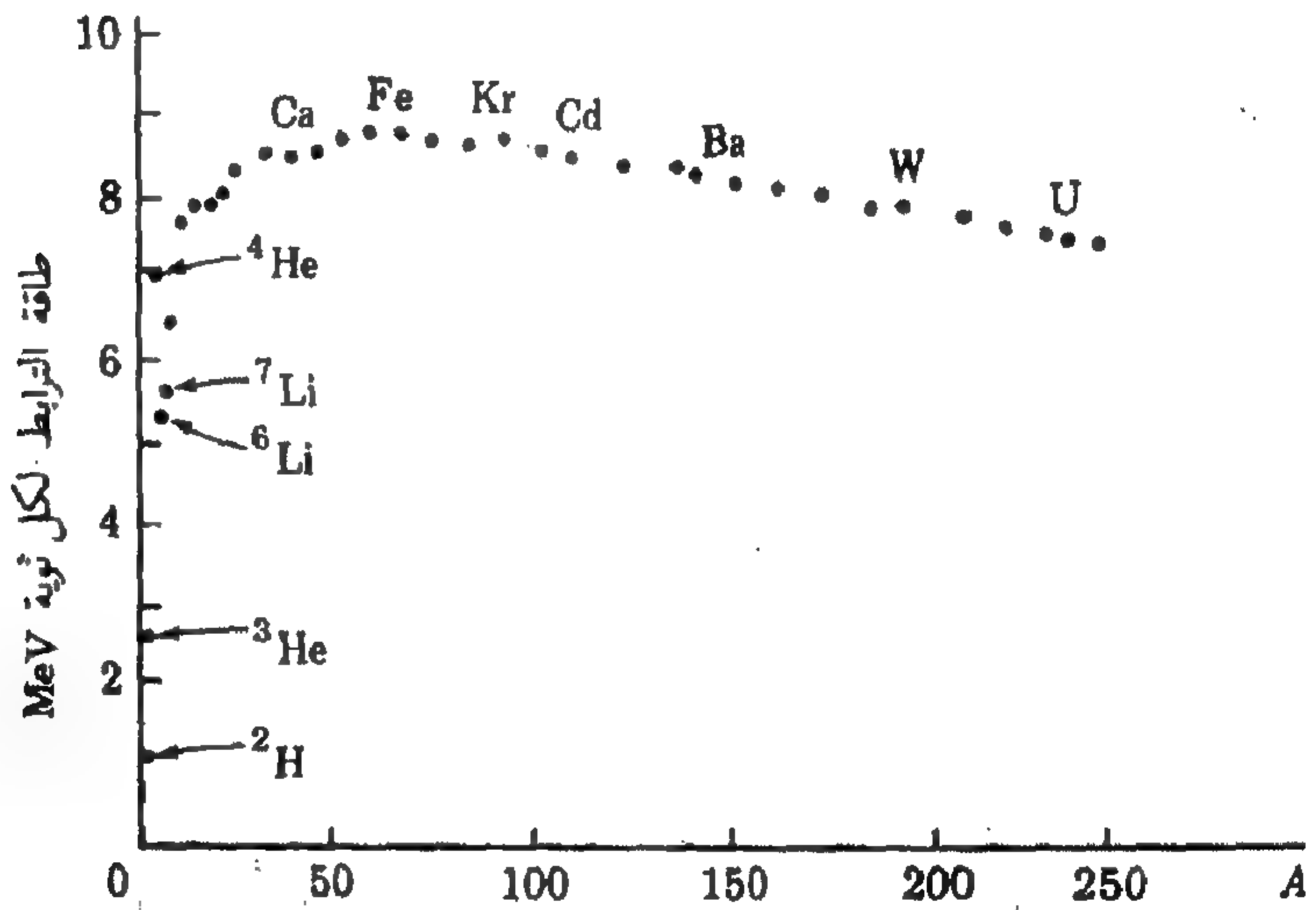
يتضح من الشكل (٢٨ - ٣) أن كل النوى له كتلة أقل من مجموع كتل البروتونات والنيوترونات التي اتحدت لتكون ذلك النوى . وقد فقدت كمية من الكتلة

وظهرت كمية من الطاقة عندما تكونت النوى . ويعنى هذا أيضا ، أن طاقة معينة تلزم لفصل النويات بعيدا عن بعضها البعض . لأنه في تلك الحالة ستحتاج إلى كتلة جديدة تخلق أثناء العملية . والطاقة اللازمة لتفتت النواة إلى مكوناتها في النويات المنفصلة تسمى طاقة ترابط النواة .

تعريف

يمكننا حساب طاقة الترابط لكل نوية من بيانات الشكل (٢٨ - ٣) مباشرة . ففقد الكتلة لكل نوية والناشئ عن تكوين نواة البيريليوم Be هو $0.007u$. وهذا يكافئ طاقة مفقودة قدرها (من المعادلة ، الطاقة $= \Delta m c^2$) 6.5 MeV . ومن ثم تكون طاقة الترابط لكل نوية في حالة نواة البيريليوم هي 6.5 MeV . فإذا ضربنا هذا القدر من الطاقة في عدد النويات الموجودة في نواة البيريليوم Be لتنتج كمية من الطاقة اللازمة لتفتت النواة تماما . نوضح في الشكل ٢٨ - ٤ رسما بيانيا لطاقة الترابط لكل نوية في حالة عناصر نموذجية . لاحظ أن كبر طاقة الترابط لكل نوية يعنى نواة مستقرة جدا وسنرجع إلى هذا الموضوع حين نناقش القدرة النووية .

طاقة الترابط
وعلاقتها بالاستقرار



شكل (٢٨ - ٤)
طاقة الترابط لكل نوية في
حالة عناصر نموذجية . لاحظ
الاستقرار العالي في حالة
 ^4He

مثال توضيحي ٢٨ - ١ ما مقدار الطاقة المنبعثة عندما تتكون نواة هليوم واحدة من النيوترونات والبروتونات ؟

طريقة الحل لقد وجدنا في القسم السابق أن الكتلة المفقودة في هذه العملية هي $0.030 u$ وحيث أن كتلة البروتون $1.007u$ أو $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ، فإنه يصبح لدينا معامل التحويل ، $1u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ومن ثم تكون الكتلة المفقودة عند تكوين نواة هليوم واحدة هي $5.0 \times 10^{-29} \text{ kg}$. وباستخدام المعادلة (٢٨ - ٤) نجد أن ،

$$\text{الطاقة} = (5.0 \times 10^{-29} \text{ kg})(9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2)$$

$$28.2 \text{ MeV} = 2.82 \times 10^7 \text{ eV} = 4.5 \times 10^{-12} \text{ J}$$

من المناسب ملاحظة أن فقد كتلة مقدارها 0.03u يؤدي إلى 28.2Mev من الطاقة .

$$1 \text{ u} \rightarrow 931 \text{ MeV} = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J}$$

نلاحظ أيضا أنه حيث أن 4g من الهليوم تحتوى على 6×10^{23} نواة فإن الطاقة المحررة عند تكوين 4g من الهليوم هي

$$(6 \times 10^{23})(4.5 \times 10^{-12} \text{ J}) = 2.7 \times 10^{12} \text{ J}$$

وهذه كمية هائلة من الطاقة ، وللمقارنة فإن الشغل المبذول في رفع رجل وزنه 100kg لمسافة 100m هو حوالى 10^4 J فقط . أما الطاقة المحررة عند تكوين 4g من نوى الهليوم من بروتونات ونيوترونات فكافية لرفع 200 مليون من الاشخاص ذوى 100kg وزنا خلال مسافة تزيد على 100m .

٢٨ - ٤ النشاط الاشعاعى

هناك بعض العناصر الموجودة في الطبيعة وليست مستقرة وانما تنحل ببطء عن طريق التخلص من جزء من نواتها . وهذه العناصر يقال أنها مشعة . وقد كان أول اكتشاف لعنصر مشع على يد هنرى بيكريل عام ١٨٩٦ عندما وجد أن ذرات اليورانيوم ($Z=92$) تصدر اشعاعات تغبش الأفلام والالواح الفوتوغرافية . ونجح بعد ذلك بعلمين كل من ماري وبير كورى في فصل عنصرين مشعين جديدين كيميائيا وهما البولونيوم ($Z=84$) والراديوم ($Z=88$) . ومنذ ذلك الحين وجد أن كل العناصر التي يزيد عددها الذرى عن 83 تعتبر إلى حد ما مشعة .

هناك الكثير من العناصر المشعة التي صنعها الانسان . فالمفاعلات النووية ، بشكل خاص ، تنتج كميات وافرة من النوى الذرى لا يمكن وجوده بكميات محسوسة في أى مكان آخر على الأرض . وهذا النوى غير مستقر بدرجة كبيرة وتطراً عليه تغيرات مشعة سريعة . وربما تكون هذه العناصر قد وجدت مبكراً على ظهر الأرض ثم تحللت منذ زمن بعيد .

وبغض النظر عن مصدر أو عمر المواد المشعة ، فكلها تتحلل (أو تنحل) حسب نفس القانون الرياضى . وهذا القانون يصاغ بدلالة N ، عدد

النوى الذى لم يتحلل بعد و ΔN وهو عدد النوى التى انحلت فى فترة زمنية هى Δt . تبين التجريبية أن ،

$$\Delta N = \lambda N \Delta t \quad (28 - 5)$$

قانون الانحلال

تعريف

حيث λ مقدار ثابت بالنسبة لمادة معينة ويسمى ثابت الانحلال . وبما أن المعادلة (28 - 5) يمكن اعادة كتابتها على الصورة $\lambda = (\Delta N/N)/\Delta t$ فإن ثابت الانحلال يصبح ذا معنى بسيط . ثابت الانحلال λ هو ذلك الكسر من النوى الذى ينحل فى وحدة الزمن .

وحيث أن λ ثابت بالنسبة لمادة معينة ، نجد أن الكسر الذى ينحل فى وحدة الزمن يكون دائما نفس المقدار ، فعلى سبيل المثال λ للراديوم هى 0.000428 yr^{-1} وهذا يدل على أنه فى أية عينة من الراديوم - بغض النظر عن تاريخها - فإن كسراً مقداره 0.000428 منها سوف ينحل فى السنة التالية . نوضح فى الشكل (28 - 5) رسماً بيانياً بين عدد النوى التى لم تنحل بعد والزمن . وواضح أن المنحنى منحنى انحلال أسى .

تعريف

توصف المواد المشعة عادة بدلالة عمر النصف لها . وعمر النصف لمادة ما هو الزمن الذى يستغرقه نصف المادة فى الانحلال . راجع الشكل (28 - 5) حيث يشار إلى عمر النصف . ويمكن رياضياً اثبات أن عمر النصف مرتبط بثابت الانحلال على النحو التالى :

$$\text{عمر النصف} = \frac{0.693}{\text{ثابت الانحلال}} \quad (28 - 6)$$

عمر النصف

وفى حالة الراديوم $\lambda = 0.000428 \text{ yr}^{-1}$ بالتعويض بهذه القيمة فى المعادلة (28 - 6) نجد أن عمر النصف للراديوم يساوى 1620 yr . ومن هذا يتبين أن نصف الراديوم سيتبقى كما هو أى راديوم بعد مرور فترة زمنية 1620 yr حتى وإن كانت عينة الراديوم مغلقة داخل أنبوبة ملحومة . أما النصف الذى فسينحل إلى نوى من نوع آخر . وبغض النظر عن الزمن الذى نبدأ فيه عملية التوقيت فإنه بعد مرور نصف عمر واحد يتبقى نصف المادة الأصلية فقط بدون تغيير .

وللمواد المشعة التى توجد فى الطبيعة أو التى تخلق اصطناعياً مدى عريض من أنصاف العمر . يبلغ نصف العمر (لليورانيوم 328) ^{238}U حوالى $4.5 \times 10^9 \text{ yr}$ وهذا هو تقريبا نفس عمر الكرة الأرضية . ونستنتج من هذا أن هذا

النظير لا يزال موجودا على ظهر الأرض لأن نصف الكمية الأصلية فقط هو الذي انحل . أما الراديوم فعمر النصف له 1620yr فقط . وكان يجب أن ينحل منذ زمن بعيد ولا يتبقى منه إلا كميات أصغر من أن تقاس . ولكن - كما سنرى - ينتج مزيد من الراديوم الجديد بشكل مستمر في الطبيعة . هناك نظائر أخرى تنتج في المفاعلات النووية لا تتعدى أنصاف أعمارها كسرا صغيرا من الثانية ولو أنها وجدت على الأرض منذ البداية لما بقى منها للآن بعد الانحلال - سوى كميات مهمة تماما .

مثال توضيحي ٢٨ - ٢ يصنع اليود 131 وهو نظير مشع في المفاعلات النووية وذلك للأغراض الطبية . ويتركز هذا النظير في الغدة الدرقية حين يدخل إلى الجسم . وهناك يعمل كمصدر للإشعاع يستخدم لعلاج تضخم الغدة الدرقية . يبلغ عمر النصف له 8 أيام . افترض أن المستشفى قد طلب 20mg من ^{131}I وقام بتخزينها لمدة 48 يوما . فكم من ^{131}I الأصلي سيبقى بعد هذه المدة ؟

طريقة الحل تنحل كمية اليود إلى النصف كلما مرت 8 أيام . ويمكننا على هذا عمل الجدول التالي

الزمن باليوم	اليود الموجود mg	الزمن باليوم	اليود الموجود mg
	1.25	32	
	0.625	40	10
	0.312	48	5
			2.5
			16
			24

أى أنه بعد 48 يوما لا يتبقى سوى 0.312g من كمية اليود الأصلية وهي 20mg

وحدة الكورى مثال توضيحي ٢٨ - ٣ : تسمى كمية المادة التى يحدث بها 3.70×10^{10}

تفتتا في الثانية الواحدة كورى (Ci) من المادة ، أما 10^{-6} Ci فهي ميكروكورى (u Ci) وهي الوحدة الأكثر شيوعا . ماهو كسر الكورى الموجود في 1 g من الراديوم ؟ نصف العمر للراديوم 1620 yr أو 5.1×10^{10} S .

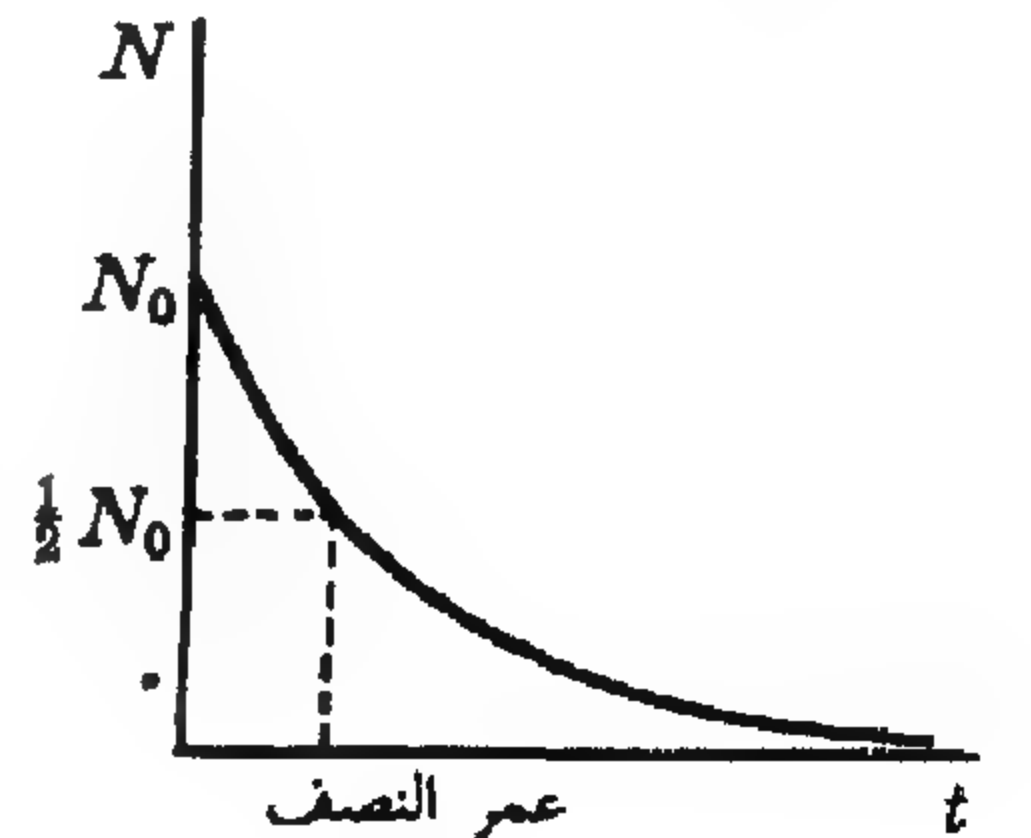
طريقة الحل عدد الذرات المنحلة في زمن قدره Δt هو :

$$\Delta N = \lambda N \Delta t$$

وحيث أن عدد أفوجادرو من الذرات موجود في كتلة ذرية واحدة من الراديوم وهي 226kg ، لذا يكون عدد الذرات N في 1kg هو ،

$$\frac{6 \times 10^{26} \text{ atoms}}{226 \text{ kg}} = 2.66 \times 10^{24} \text{ atoms/kg}$$

شكل (٢٨ - ٥)
ينحل العنصر المشع أسيا .
وعمر النصف هو الزمن
الذى يستغرقه نصف النوى
في الانحلال .



ولازلنا في حاجة لايجاد λ . ويمكن عمل هذا باستخدام المعادلة (٢٨ - ٦) ، لدينا ،

$$\lambda = 1.36 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1} \quad \text{أو} \quad \lambda(5.1 \times 10^{10} \text{ s}) = 0.693$$

وبوضع هذه القيمة في التعبير الأول لـ ΔN نجد أن

$$\begin{aligned} \Delta N &= (1.36 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1})(2.66 \times 10^{21} \text{ atoms/g}) \Delta t \\ &= 3.6 \times 10^{10} \Delta t \quad \text{atoms/g} \end{aligned}$$

وذلك حين يعبر عن Δt بالثواني . ويكون عدد التفتتات في الثانية في 1g من الراديوم هو 3.6×10^{10} ولما كان 1Ci من المادة قد عرف على أنه 3.7×10^{10} تفتتاً في الثانية الواحدة ، فإن 1g من الراديوم سيكون $3.6/3.7$ أو 0.97Ci . وفي الحقيقة اعتقد في الأصل أن الكورى هو عدد التفتتات الصادرة في الثانية من 1g من الراديوم ولكن القياسات الدقيقة أوضحت أن الكورى المعروف بهذه الطريقة أكبر قليلاً من القيمة العملية .

٢٨ - ٥ نواتج الانحلال والمتاليات ذات النشاط الاشعاعى

حين تبتعث نواة ما جسيماً فمن الواضح أنها تتغير بشكل ما . والنوى المشع الموجود في الطبيعة يبتعث جسيمات α ، وجسيمات β وأشعة γ . وليس شعاع γ سوى شعاع من أشعة X وهو طاقة صرفة مقدارها $h\nu$ أو $h(c/\lambda)$ والنواة لا تفقد أية شحنة أو أية كتلة محسوسة عندما تبتعث شعاع γ . فالنواة ، إذن ، تتغير ولكن ليس بدرجة كبيرة بمثل هذا الابتعاث .

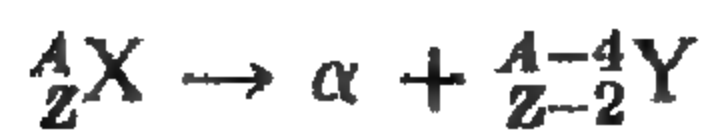
وعند ابتعاث شعاع γ تقوم النواة بمجرد ضبط تركيبها الداخلى بحيث يتبأ لفقد بعض الطاقة . وهذا شبيه بابتعاث الضوء من الذرة . ففي الذرة ، يفقد قدر من الطاقة عندما يهبط الكترون إلى مستوى طاقة أدنى . على أننا لسنا واثقين عن ماذا يجرى حقيقة في النواة حين يخرج منها شعاع γ . فالنواة قد هبطت إلى حالة أدنى للطاقة ولكننا لا نعرف ما يكفى حول تركيب النواة لكى نصف هذا النوع من الانتقال بنفس الدقة تقريبا التى اتبعناها في حالة الذرة . وعلى أية حال ، إذا فقدت النواة $\frac{4}{2}X$ شعاع γ فإن التفاعل يكتب عادة بهذه الصورة :



والشحنة النهائية Z وكذا الكتلة A للنواة هما نفسيهما مثلما كانا قبل ابتعاث شعاع

γ

أما حين تبتعث النواة جسيم α ، فإن كتلة النواة تنقص بمقدار 4 وشحنتها بمقدار 2 وذلك راجع إلى أن جسيم α المبتعث هو في الواقع نواة ذرة هليوم ${}^4_2\text{He}$ ، ولمثل هذا النوع من الابتعاث يمكن أن نكتب مايلي :

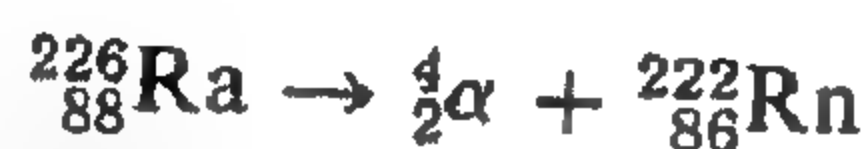


وكمثال محدد لنأخذ الراديوم حين يبتعث جسيم α ، وعندئذ



والنواة الناتجة هي غاز الرادون الخامل .

من المناسب أحيانا كتابة اعداد الكتلة والشحنة بالنسبة للجسيم أيضا :

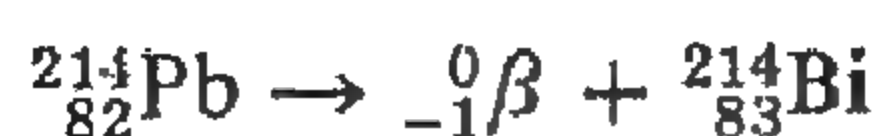


لاحظ في هذه المعادلة أن مجموع أعداد الكتلة على كلا الجانبين يجب أن يكون متساويا وكذلك بالنسبة للشحنات .

جسيمات β هي ببساطة الكترونات . وحين تبتعث النواة جسيم β فإننا نجابه صعوبة تتعلق بالمفاهيم الأساسية إذ أنه لا توجد الكترونات داخل النواة ، وعندئذ يمكننا أن نتخيل أن النيوترون هو بروتون زائد الكترون . (هذه بالطبع تبسيطية قد تكون مفيدة ولكن لا سند لصحتها) . عندما يبتعث جسيم β فإن النيوترون الأصلي في النواة يستبدل به بروتون . ومن ثم يزيد ابتعاث جسيم β من الشحنة الصافية على النواة بمقدار 1 ولايكاد يغير من كتلتها . (لأن كتلة الالكترن صغيرة جدا) . وفي إحدى الحالات النموذجية ،



ولتصور هذا النوع من التفاعل سنناقش واحدا من نظائر الرصاص ذات الكتلة الضخيلة وهو ${}^{214}_{82}\text{Pb}$ الذي نصف عمره 26.8 min وينحل بابتعاث جسيمات β . ولهذا ،

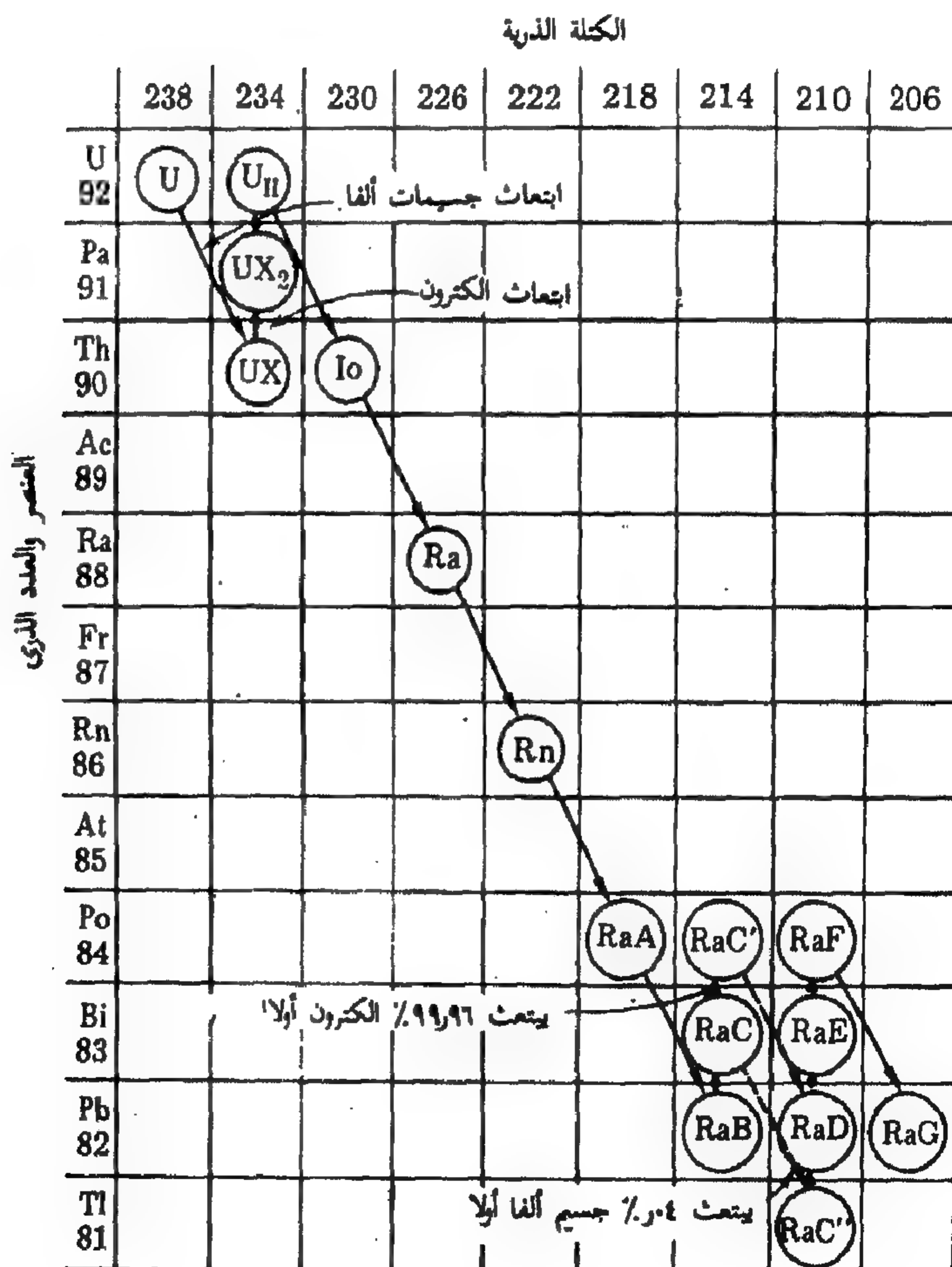


ينحل نظير البزموت المتكون في هذا التفاعل بابتعاث β أيضا . وكلا النظيرين ليسا سوى خطوات في متتالية من الانحلالات .

متسلسلة
الانحلال

تعتبر متتالية اليورانيوم مثالا مثيرا على ذلك النمط من الانحلال الذي تنحل فيه نواة إلى أخرى وتنحل هذه إلى نواة أخرى وهكذا . اليورانيوم ^{238}U يعتبر مشعا طفيفا ، ونصف عمره $4.5 \times 10^9 \text{ yr}$ وينحل طبقا للنهج الموضح في الشكل ٢٨ - ٦ ، وعليك تتبع هذا النهج خطوة بخطوة حتى تدرك معناه . لاحظ أن الأسماء مثل راديوم A ، وهكذا ، تستخدم بدلا من الأسماء الذرية العادية المذكورة إلى اليسار في الشكل . وهذه هي الطريقة المتبعة أحيانا وليس دائما لكتابة أسماء أعضاء هذه المتتالية .

النواة النهائية في الشكل (٢٨ - ٦) هي الرصاص بالنسبة لهذه المتتالية . هناك متتاليتان أخريان كهذه تحدثان في الطبيعة وكل منهما تبدأ بنواة ذات نصف عمر طويل . وربما كان هناك متتاليات أخرى انحلت وانتهى أمرها إلى آثار ضئيلة لا تحس . وعلى أية حال يكون آخر عضو في المتتالية نواة مستقرة دائما ، والنواة النهائية لكل متتالية هي نواة الرصاص ولكنها نظير مختلف في كل حالة .



شكل (٢٨ - ٦)
متتالية إشعاعية نموذجية
تسمى متتالية اليورانيوم
وذلك لأن اليورانيوم هو
النواة البتروج .

٢٨ - ٦ التفاعلات النووية والتحولات :

عندما كتبنا معادلة الانحلال الاشعاعى ،



فى القسم السابق ، فإننا بذلك كتبنا تفاعلا نوويا . وهناك العديد من العوامل التى تحدد ما إذا كان تفاعل نووى ما مفترض سيحدث حقيقة أم لا . وإن كان هذا التفاعل المعين يحدث بالفعل . ونحن نعلم أن الطاقة الكلية ، بما فى ذلك طاقة السكون للمواد الداخلة فى التفاعل الأصلية (وهى مجرد $^{226}_{88}\text{Ra}$) مساوية للطاقة النهائية للتواتج . ولكى يكون هذا صحيحا ، لزم أن تكون كتلة السكون لنواة الراديوم الأصلية أكبر من أو تساوى كتل السكون للناتجين وهما نواة الرادون وجسيم α . أما إذا لم يكن هذا صحيحا فإننا نكون قد خلقنا كتلة أثناء التفاعل وحيث أننا افترضنا عدم وجود أى مصدر خارجى للطاقة يؤثر على النظام فإننا بذلك نخلق كتلة من لا شئ وهذا مستحيل بالطبع .

وكون الطاقة الكلية قبل التفاعل (بما فى ذلك الطاقة المكافئة لكتل السكون) مساوية للطاقة الكلية بعد التفاعل ، يعتبر أداة مفيدة لدراسة التفاعلات النووية . ففى واحد من أوائل التفاعلات النووية المستحثة والتى أجراها رذرفورد عام ١٩١٨ ، قام بقذف جسيمات α نحو نوى النيتروجين ولاحظ التفاعل التالى ،



ويعنى هذا أن جسيم α قد دخل نواة $^{14}_7\text{N}$ التى قامت بعد ذلك بالانحلال عن طريق طرد بروتون وهذا تحولت نواة النيتروجين الأصلية إلى أكسجين . ولنا أن نتساءل عما إذا كانت جسيمات α البطيئة قادرة على انجاز هذا التفاعل .

ولكى نعلم أكثر عن هذا التفاعل ، نلاحظ أن كتل المواد الداخلة فى التفاعل هى

$$\text{كتلة } ^{14}_7\text{N} = 14.0031 \text{ u}$$

$$\text{كتلة } ^4_2\text{He} = 4.0026$$

$$\text{مجموع الكتل قبل التفاعل} = 18.0057 \text{ u}$$

وبنفس الطريقة ، يمكننا فحص الكتل بعد التفاعل ،

$$\text{كتلة } ^{17}\text{O} = 16.9991 \text{ u}$$

$$\text{كتلة } ^1\text{H} = 1.0078$$

$$\text{مجموع الكتل بعد التفاعل} = 18.0069 \text{ u}$$

ونجد على الفور أن النواتج لها كتلة أكبر من كتلة المواد الأصلية في التفاعل ، والفرق بينهما 0.0012 u ، وهذه الكتلة يمكن أن تخلق فقط في حالة إضافة طاقة إضافية إلى التفاعل . وحيث أن 1.0 u تكافئ 931 MeV كما في المثال التوضيحي (٢٨ - ١) لذا فالزيادة في الكتلة في هذا التفاعل تتطلب قدرا من الطاقة الخارجية يساوي $(0.0012) \times (931) = 1.1 \text{ MeV}$ أى أن جسيمات α الساقطة يجب أن يكون لديها كمية من ط . ح تساوى على الأقل هذا القدر من الطاقة حتى تجعل التفاعل يتم . وفي الواقع لما كانت كمية التحرك أيضا يجب أن تكون محفوظة في هذا التفاعل لذا فالنواتج النهائية لن تكون واقفة في حالة السكون . ولهذا يجب أن تكون طاقة الحركة للجسيم أكبر من 1.1 MeV إذا أريد لهذا التفاعل أن يتم .

وتقدم الحسابات من هذا القبيل الكثير حول احتمالات التفاعلات النووية المقترحة . ومن الطبيعي أن يكون هناك كثير من التفاعلات الممكنة . وفي الحقيقة فإن مجال التفاعلات النووية في الفيزياء يشبه في تشابكه موضوع التفاعلات العضوية في الكيمياء .

٢٨ - ٧ القوى النووية والاستقرار النووي

لقد أتبع لنا بدراسة الفيزياء معرفة قوتين أساسيتين حتى الآن . احدهما هي قوة الجذب وهي على قدر كبير من الأهمية عندما تكون الأشياء المعنية ضخمة الكتلة . وهذه القوة تجذب دائما وإن كانت واهنة . فإذا وضع جسمان على منصدة لجذب كل منهما الآخر ولصغر القوة فإن قياسها لا يمكن إلا بأجهزة فائقة الحساسية .

أما القوة الأساسية الثانية والتي صادفتنا فيما سبق فهي القوة الكهربائية وهي أما قوة تجاذب أو تنافر استنادا إلى الشحنات المعنية . وهذه القوة كبيرة بدرجة كافية ومن السهل تمثيلها بالشحنات الالكتروستاتية ، فمن السهل قياس القوة التي تؤثر بها كرتان مشحونتان ، مثلا ، احدهما على الأخرى . وقد ظن - في وقت ما - أن القوى المغناطيسية تختلف عن القوى الكهربائية ولكن بعد استخدام نظرية النسبية ، اتضح أن هاتين القوتين هما أساسا نفس الشيء . والقوة الكهربائية هي التي تمسك بالذرات معا وكذا بالسوائل والجوامد . وترتبط معظم الظواهر التي نقابلها في حياتنا اليومية ارتباطا وثيقا بهذه القوة .

هناك أيضا قوة أخرى قد لا تكون مألوفة لديك . وهذه القوة الثالثة هي التي تمسك بالنويات معا داخل النواة . وعلى عكس القوتين الآخرين لا تخضع هذه القوة لقانون التربيع العكسي ، ولعلك تذكر أن كلا من قوة الجذب والقوة الكهربائية تتغير تبعا للعلاقة $1/r^2$ ولذا فهي قوى بعيدة المدى بمعنى أنها قوى محدودة ولا تصل للصفر حتى عند قيم كبيرة للمسافة r .

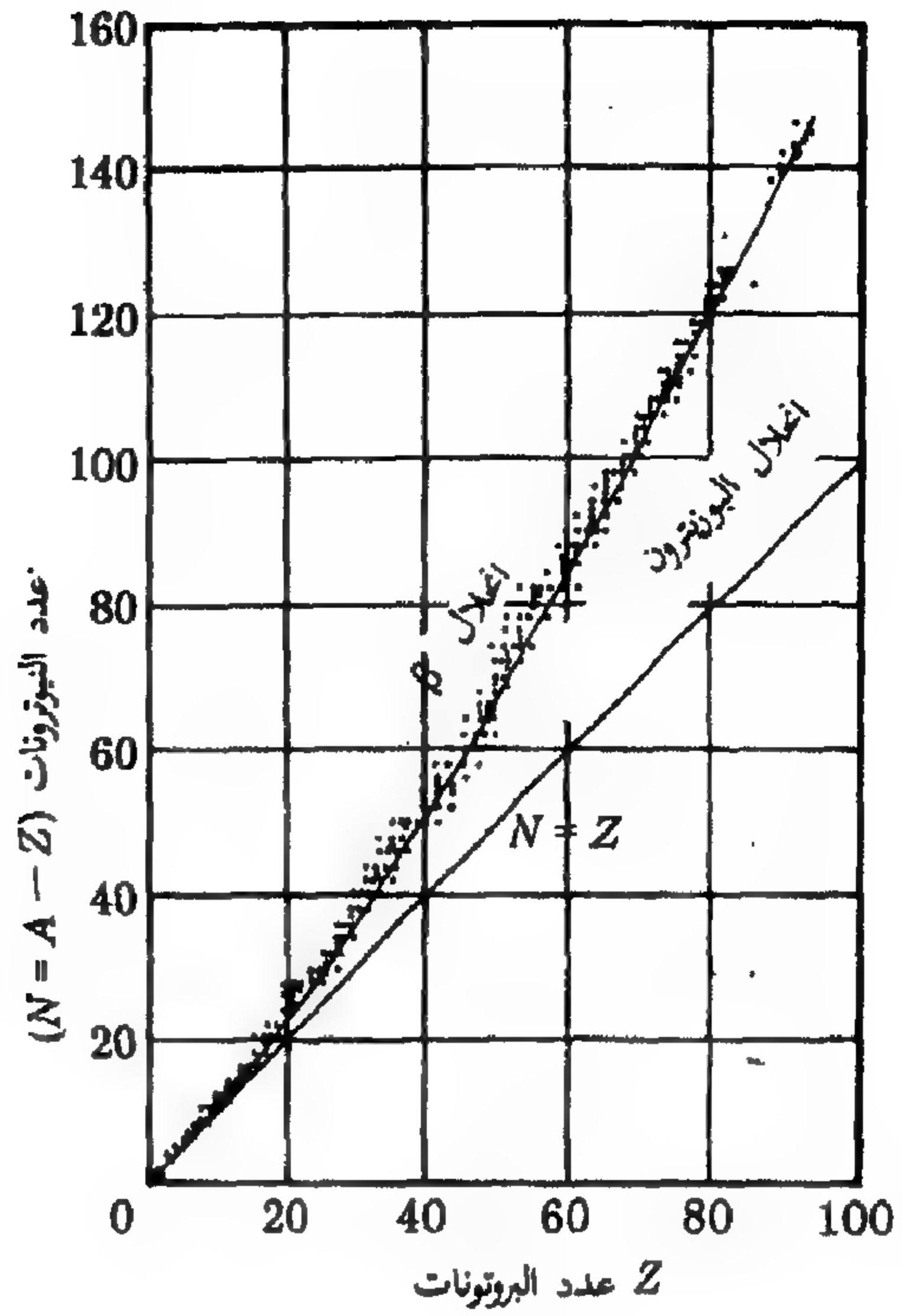
وتعتبر القوة النووية من ناحية أخرى قوة ذات مدى قصير جدا بمعنى أن نويتين تؤثران بقوى ضئيلة للغاية على كل منهما الأخرى حتى تصبح المسافة بينهما أقل من $5 \times 10^{-15} \text{ m}$ وعندئذ تتجاذبان بشدة كلما قلت المسافة عن هذا . وقوة الجذب النووي من الكبر بمكان بحيث أنه عندما تكون المسافة صغيرة جدا بين النويات فإنها تتغلب تماما على قوى التنافر الكهربائية . فعلى الرغم من أن بروتونين ، مثلا ، تتنافر شحنتاهما المتشابهة مع بعضها البعض ، إلا أنهما يتماسكان بشدة بواسطة القوة النووية . وبتقريب أولى - على الأقل - تكون القوة النووية التجاذبية هي نفسها بين البروتون والبروتون وكذلك بين نيوترون ونيوترون أو بين بروتون ونيوترون .

وعلى الرغم من شدتها ، إلا أن القوة النووية عاجزة عن الإمساك بعدد كبير من البروتونات معا بدون وجود عدد كاف من النيوترونات يقوم « بتخفيف » الشحنة الموجبة قليلا . فقوة التنافر الالكتروستاتيكية هي قوة بعيدة المدى ، « ويشعر » كل بروتون بأثر كل بروتون آخر داخل النواة . أما قوى التجاذب النووية فقصيرة المدى ولا يشعر بها سوى أقرب الجيران من الجسيمات داخل النواة . ولهذا السبب - ضمن أسباب أخرى - لا تتكون تشكيلات مستقرة للنواة من البروتونات والنيوترونات إلا في حدود معينة ويوضح الشكل (٢٨ - ٧) النوى المستقرة المعروفة .

لاحظ المحاور في الشكل (٢٨ - ٧) . لو أن للنوى عدد متساو من البروتونات والنيوترونات لوقع هذا النوى على الخط $N = Z$ ، على أننا نرى أن النوى الأكبر يستلزم مزيدا من النيوترونات حتى يخفف من الشحنة الموجبة وحتى يضمن بالتالي قدرا من الاستقرار . يوضح الشكل أيضا الأنماط المختلفة لانحلال النوى غير المستقرة والذي يحيد عما هو مبين . عليك أن تكون قادرا على إثبات أن أنماط الانحلال المبينة تميل إلى تحويل النوى غير المستقرة إلى صورة مستقرة . (وفي هذا الصدد عليك أن تذكر أن شحنة البوزيترون هي $+e$ وكتلته هي كتلة الالكترون) .

لقد تعلمنا - بالاضافة إلى هذه الاعتبارات - من القسم (٢٨ - ٣) أن النقص الكتلي للنواة هو الذي يوفر لنا محكا آخر للاستقرار النووي . وقد رأينا في الشكل ٢٨ - ٤ أن النوى قرب منتصف قائمة العناصر يكون له أعلى طاقة ترابط لكل

شكل (٢٨ - ٧)
النوى الموضح هنا على هيئة
نقط هو نوى مستقر أو يزيد
عمر النصف له عن 1000
سنة .



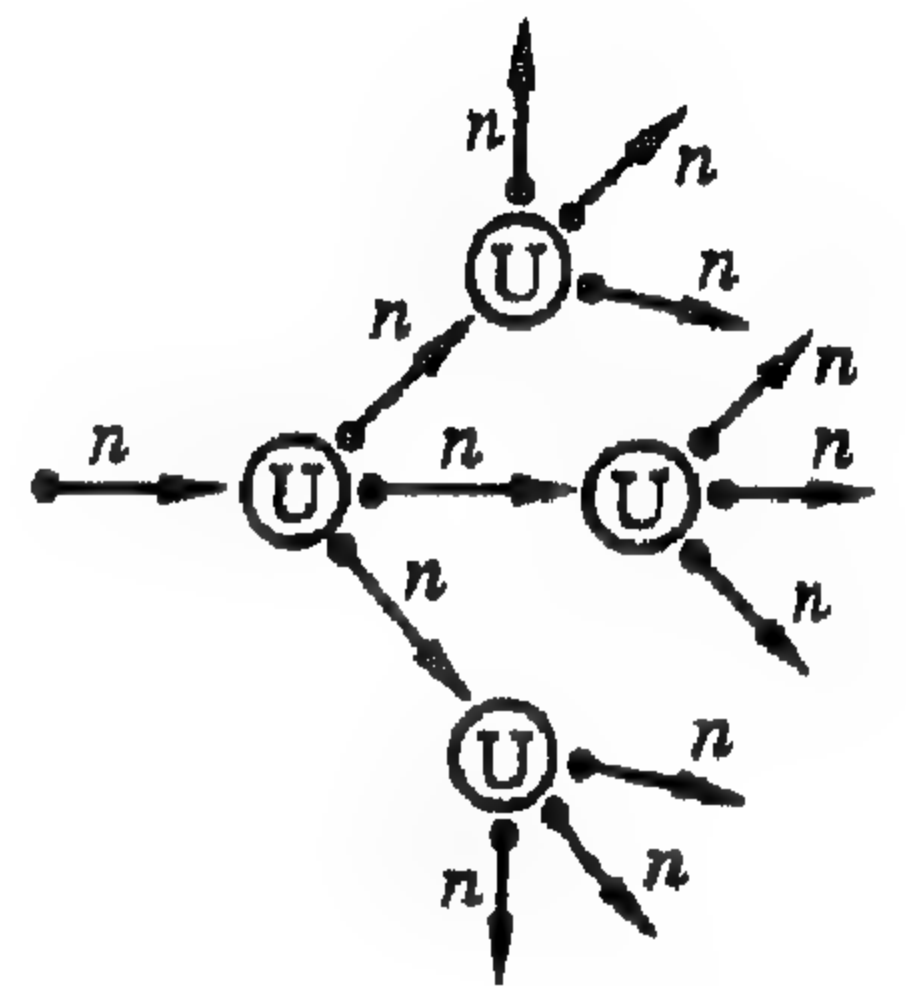
نوية . وهذا النوى ذو صلابة ذاتية ضد التفتت - أكبر من النوى الموجودة عند
طرفى قائمة العناصر . وكما سنرى فيما يلى ينطوى هذا الأمر على دلالات ونتائج تطبيقية
كبيرة .

٢٨ - ٨ الانشطار النووى

تعتبر مصادر الطاقة النووية احد الاختيارات المطروحة أمامنا فى بحثنا عن الطاقة .
ولنفحص الآن هذا التطبيق العملى للفيزياء النووية . لو رجعنا إلى الشكل (٢٨ - ٤)
لوجدنا أن النوى الموجودة فى طرفى قائمة العناصر تكون طاقتها لكل نوية أكبر
من مثيلتها عند العناصر الموجودة فى منتصف القائمة . افترض أن نواة ذات
 Z عالية كالسيوم قد شقت إلى نصفين بحيث يتكون جسيमान شحنة كل
منهما $Z/2$ وكتلتهما متساوية . وبسبب النقص الكتلى ستكون كتلة هذه الجسيمات
أكبر بكثير من كتلة النواة المستقرة للعنصر ذى العدد الذرى $Z/2$. وفى نهاية الأمر ،
لتكوين نواتين مستقرتين وعدد كل منهما الذرى $Z/2$ يلزم أن يشع النصفان الأصليان
غير المستقران طاقة تكافئ النقص الكتلى . وكما وجدنا من قبل ، يلزم لكى تحدث
هذه العملية أن تتحرر كمية كبيرة من الطاقة ويمكن عندئذ الاستفادة منها ، ومن
سوء الحظ أن انشطار النوى ذى Z العالى إلى نوى ذى حجم متوسط وهى
عملية تسمى الانشطار - هى عملية نادرة ما تحدث تلقائياً . وعلى الرغم من
أن نواتج تفاعل الانشطار تكون طاقتها أقل من المادة الأصلية إلا أن التفاعل يستلزم
وجود مؤثر خارجى حتى يكتمل .

هناك موقف مشابه لهذا في الكيمياء ، فالخشب حين يحرق في الهواء يعطى حرارة . من الواضح إذن أن المواد الداخلة في التفاعل لديها من الطاقة ما هو أكثر من النواتج ومن ثم يكون التفاعل ممكناً . على أن الخشب لا يتحد تلقائياً مع الأكسجين عند درجة حرارة الغرفة - على الأقل ليس إلى حد بعيد . أى أن التفاعل الكيميائى بين الخشب والأكسجين يجب أن يبدأ أولاً بواسطة وسيلة خارجية ما مثل شعلة ثقاب ساخنة مثلاً . وبمجرد أن يبدأ التفاعل فإنه ينتج من الحرارة ما يكفى لأن يظل مستمراً بشرط أن تكون الشروط الهندسية لقطعة الخشب بحيث لا تهرب الحرارة المتولدة بسهولة منها .

وقد اتضح أن نوى معظم العناصر الثقيلة لا يستطيع أن ينشق بسهولة . وقد يؤدي قذفها بالجسيمات ذات الطاقة العالية أحياناً إلى الانشقاق . وعلى الرغم من أن الطاقة التي تنشأ عند حدوث تفاعل الانشطار تكون أكثر مما يحتاجه التفاعل لكى يبدأ ، إلا أن هذه الطاقة لا يمكن استخدامها بسهولة لكى يحتفظ بالتفاعل مستمراً . ومن ثم فإنه على الرغم من أن كل النوى الثقيل يعتبر مصادر غنية بالطاقة إلا أنه من غير العملى الحصول على الطاقة الناشئة من تفاعل الانشطار فى جميع الحالات تقريباً .



شكل (٢٨ - ٨)
يمكن بدأ تفاعل متسلسل
بواسطة نيوترون واحد .

على أن هناك حالات قليلة ، ثبت فيها أن لتفاعل الانشطار أهمية تطبيقية . وقد اكتشفت أولى هذه الحالات على يد هاهن وستراسمان عام ١٩٣٩ وقد وجد بمساعدة آخرين أن نظيراً لليورانيوم وهو ^{235}U يمكنه اقتناص (أو يجذب إليه) نيوترون يتحرك ببطء ، وعندئذ يستطيع أن يقوم بعمل انشطار تلقائى* . وهما تفاعل انشطار لم يستلزم قذفاً عن الطاقات العالية . علاوة على ذلك ، حين تنشق كل نواة ^{235}U فإن نواتج التفاعل تتضمن حوالى ثلاثة نيوترونات ، وكمية كبيرة بالطبع من الطاقة الناشئة حيث تعطى كل نواة ^{235}U حوالى 200 MeV من الطاقة عند انشقاقها .

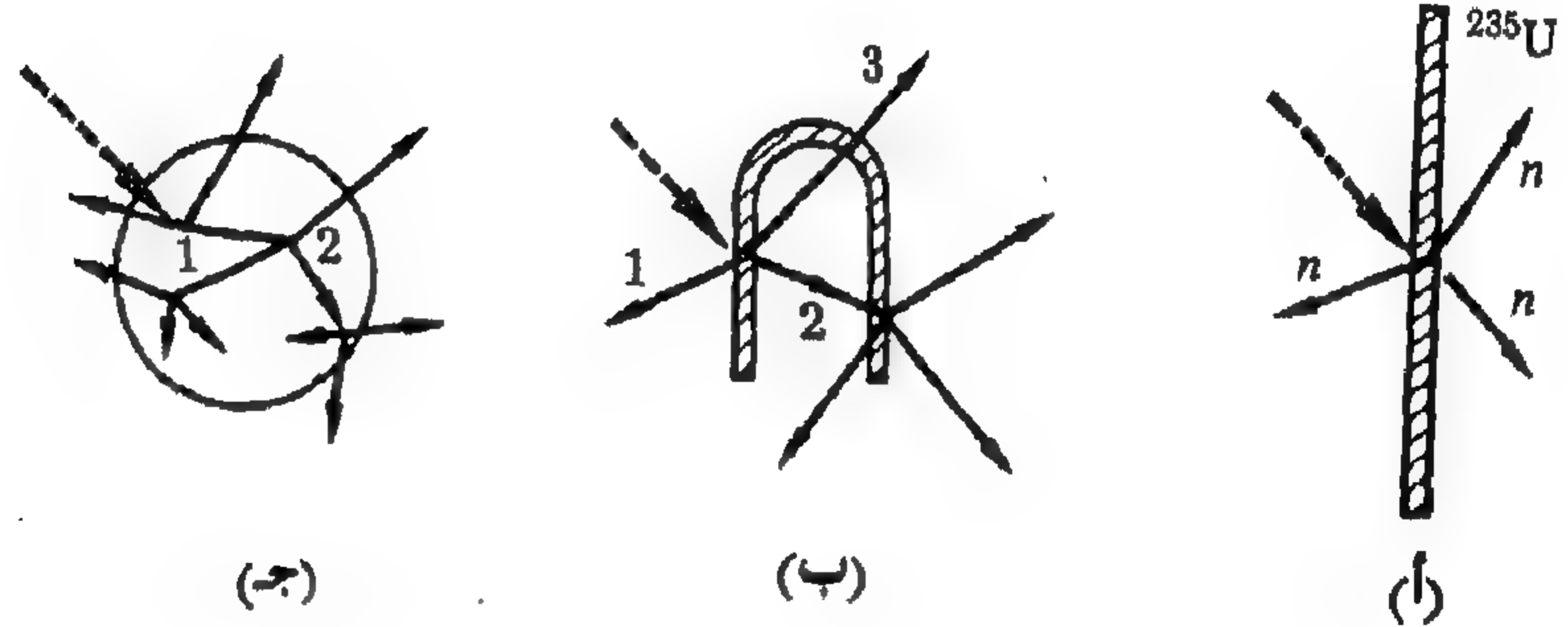
يمكننا ، إذن ، تصور تفاعل متسلسل فى ^{235}U يبدأه نيوترون بطيء واحد . وهذا ما يصوره الشكل (٢٨ - ٨) بشكل بيانى حيث تشاهد أول خطوتين من التفاعل فقط أما إذا تم قنص جميع النيوترونات بنجاح بواسطة نوى ^{235}U فإن النيوترون الأصلي يكون قد أنتج 3 نيوترونات . أما فى موقف نموذجى حيث تحدث "خطوة فى التفاعل المتسلسل فإننا نكون قد حصلنا على 3 نيوترونات . ولو أن كل خطوة من التفاعل تستغرق 0.01 s فإنه عند نهاية ثانية واحدة يكون العدد الكلى

تفاعل متسلسل

* بشكل نظير اليورانيوم 0.7 فى المائة فقط من خليط نظائر اليورانيوم الموجودة فى الطبيعة .

لليوترونات 3^{108} أو مايقرب من 10^{48} . ولما كان 235 g من ^{235}U تحتوى على 6×10^{23} ذرة فقط فلك أن تدرك أن هذا التفاعل يمكن أن يحدث بعنف تفجيرى .

ولو أريد للتفاعل أن يستمر سلسا وأن يكون ذاتى المداومة فإنه تلزم كتلة حرجية من ^{235}U كما هو مبين بسهولة فى الشكل (٢٨ - ٩) ، فحين يحدث الانشطار فى الغشاء الرقيق المبين فى الجزء (أ) فإن النيوترونات الناتجة يمكن أن تهرب بسهولة فى الهواء ومن ثم لا يستمر التفاعل فى النمو . أما فى الجزء (ب) فالموقف أكثر ملاءمة بشكل أو بآخر . ولكنه هنا أيضا يتوقف تماما بعد خطوتين فقط بسبب فقدان النيوترونات فى الاجسام المحيطة . ويرى فى الشكل (ج) كرة من ^{235}U . لو أن هذه الكرة كانت كبيرة بدرجة كافية فإن معظم النيوترونات الناتجة سوف تقتنص قبل أن تتمكن من الهرب . والكتلة الحرجية هى عبارة عن كمية من ^{235}U يقوم فيها نيوترون واحد - فى المتوسط - من كل تفاعل ببدء تفاعل جديد ، وهذه الطريقة يظل التفاعل مستمرا بسلسلة بنفس معدله الابتدائى البطيء .

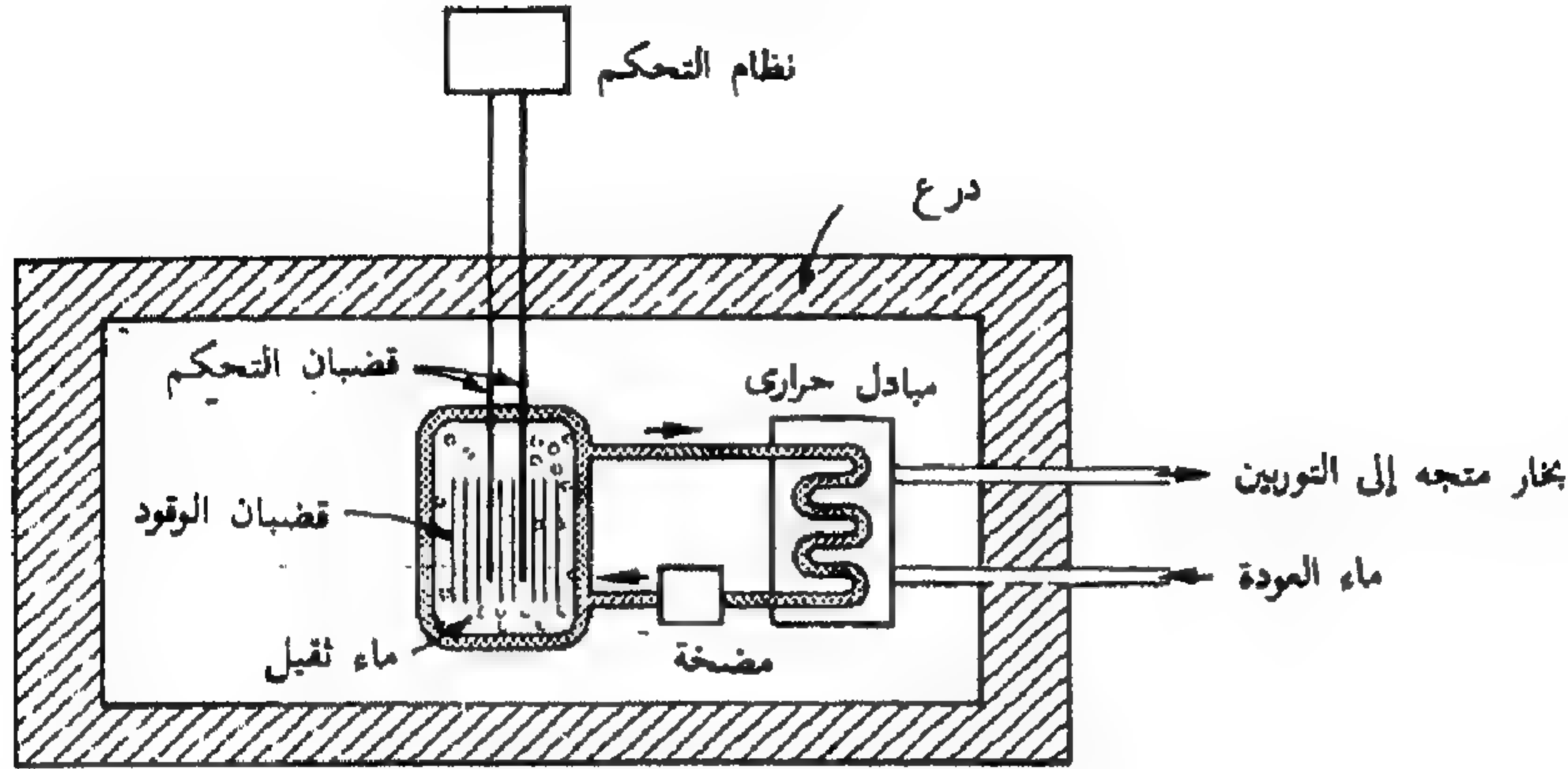


شكل (٢٨ - ٩)
تعتمد كفاءة استخدام
النيوترون على حجم وشكل
قطعة اليورانيوم ^{235}U

إذا كانت الكمية المستخدمة من اليورانيوم أكبر بكثير من الكتلة الحرجية ، فإن التفاعل سينمو بمعدل سريع ويؤدى هذا إلى حدوث انفجار . وقد يكون هذا مطلوبا إذا أراد الانسان صنع سلاح نووى . على أنه ، فى المفاعلات النووية ، يراد للتفاعل أن يستمر بشكل سلس بحيث ينتج فى النهاية مصدر منتظم وغير متفجر للطاقة . ومن الناحية العملية يمكن التحكم فى عدد النيوترونات المتفاعلة فى المفاعل باستخدام قضبان ماصة للنيوترونات ، فقضبان الكادميوم ، مثلا ، تمتص النيوترونات بسهولة وبذا تبعدهم عن التفاعل ، ومن ثم ، لو وضعت هذه القضبان داخل المفاعل فإن التفاعل النووى يأخذ فى الابطاء . ويمكن ضبط معدل التفاعل بشكل جيد بالتحكم فى وضع قضبان من هذا النوع فى المفاعل .

٢٨ - ٩ المفاعلات النووية

المفاعل هو محطة قوى نووية تخدم نفس الغرض الذى يخدمه الفرن فى مولد بخارى . فهو يعمل كمصدر هائل للحرارة ثم تستخدم هذه الحرارة فى انتاج البخار الذى يستخدم بدوره فى إدارة التوربينات لنظام مولد كهربائى . ويوضح الشكل (٢٨ - ١٠) رسما تخطيطيا لمفاعل نموذجى .



شكل (٢٨ - ١٠)
رسم تخطيطى لمفاعل

يتكون قلب المفاعل من المادة القابلة للانشطار ، أو الوقود ، وهى محفوظة فى أنابيب اسطوانية محكمة . لقد كان ^{235}U الوقود الأساسى للمفاعلات أما الآن فتستخدم مواد أخرى قابلة للانشطار وهى على هيئة قضبان للوقود . تغمر هذه القضبان فى مادة كالماء أو الكربون أو الهيدروكربونات أو أية مواد شبيهة تكون كتلتها الذرية منخفضة . وهذه المادة وهى تسمى مهدىء النيوترونات تبطئ النيوترونات الناتجة عن الانشطار . وتعكسهم إلى المادة القابلة للانشطار مرة أخرى . (يستخدم كثيرا الماء المصنوع من النظير ^2H بدلا من ^1H لأنه أقل ملائمة لإزالة النيوترونات من التفاعل .) يعمل مهدىء النيوترونات أيضا عمل سائل المبادلة الحرارية حتى يحمل الحرارة بعيدا عن قضبان الوقود وذلك فى التصميم المبين بالشكل .

عندما تنشط نواة ما داخل قضيب للوقود ، فإن نوى على درجة كبيرة من عدم الاستقرار ينتج بحيث تكون Z له متوسطة ، وهذا النوى بدوره يمر بفترة التحلل إشعاعى مكثف وتخرج فى هذه العملية جسيمات ذات طاقات عالية . وحين يحدث إبطاء لسرعة هذه الجسيمات فإن طاقتها تتحول إلى حرارة وبذا تقوم بتسخين نظام المفاعل . ثم تحمل هذه الحرارة بعيدا فى المبادل الحرارى بواسطة الماء الثقيل .

تنتقل الحرارة فى المبادل الحرارى إلى الماء العادى فى نظام مرجل للبخار فيتولد بخار يمكن استخدامه لتشغيل التوربينات الكهربائية . وكما نرى فالبخار نفسه لا يتصل اتصالا مباشرا بقلب المفاعل ولذا فممنسوب النشاط الإشعاعى يكون منخفضا . أما

السائل الذى يتغلغل داخل القلب فإنه يتعرض لقذف اشعاعى من نواتج الانشطار .
وكباقي اجزاء مادة القلب ، يصبح السائل على درجة عالية من الفعالية الاشعاعية .

حين تستخدم مادة قضبان الوقود لفترة تصل إلى عدة شهور فإن ما بها من مادة قابلة للانشطار يأخذ فى النفاذ وعندئذ تنزع القضبان ويستبدل بها قضبان جديدة .
ولسوء الحظ لازلنا نفتقر إلى وسيلة مرضية للتخلص من نفايات القضبان القديمة التى تحتوى على نواتج الانشطار وهى تتميز بأعمار طويلة نسبيا على درجة عالية من الفعالية الاشعاعية التى تتطلب قرونا حتى تنحل إلى مستويات غير ضاره . وتعتبر مشكلة التخلص من هذه النفايات أحد العيوب الرئيسية للمفاعلات النووية .

على أن المفاعلات يمكن أن تمدنا أيضا بالمواد المشعة اللازمة للأغراض الطبية والصناعية وغيرها . وتصنع مصادر الاشعاع العديدة ، والمستخدمة حاليا فى المستشفيات والصناعة ومعامل البحوث ، بوضع مواد مناسبة داخل قلب المفاعل . وبالإضافة إلى ذلك هناك كثير من مفاعلات البحوث فى أجزاء كثيرة من العالم . ويضخ الاشعاع الكثيف داخل قلوبها خلال « أنابيب » إلى خارج المفاعل على شكل حزم اشعاعية قوية . وكما نرى فعملية الانشطار لها فوائد عظيمة كما أن لها أخطاء جسيمة للبشرية .

٢٨ - ١٠ التفاعل الاندماجى

تبنى عملية الانشطار على فكرة أن النوى ذا Z العالية تكون بها طاقة لكل نوية أكبر بكثير مما فى النوى ذى Z المتوسطة . ولنعتبر الآن عملية أخرى يتم فيها اطلاق الطاقة كما يشارك فى هذه العملية نوى ذو اعداد ذرية صغيرة . وقد وجدنا عند مناقشة النقص الكتلى أن الطاقة تنطلق عندما تندمج البروتونات والنيوترونات معا لتكوين نواة الهليوم . وهناك عملية شبيهة ممكنة عندما يندمج أى نوى خفيف معا لتكوين نوى ذى Z متوسطة . ويدلنا الشكل (٢٨ - ٤) على أن طاقة معينة يجب أن تنطلق فى مثل هذه العملية الاندماجية .

ولسوء الحظ ، يعتبر الاندماج النووى أكثر صعوبة من الانشطار . فالشحنة الالكتروستاتية على النواة تساعد عملية الانشطار وذلك لأن الشحنات المتشابهة تتنافر بينما إذا حاولنا أن ندمج بروتونين ، مثلا فإن التنافر الكولومى للنواتين سيعيق عملية الاندماج . ويمكننا بصعوبة بالغة أن نحضر نواتين خفيفتين إلى مسافة قريبة من بعضهما البعض حتى يتاح لقوى التجاذب النووية أن تمسكهما معا . وعلى الرغم من أن التفاعل الاندماجى الاجمالى تصدر عنه طاقة أكبر من الطاقة التى وضعت فيه فى البداية الا أن قدرا هائلا من الطاقة يلزم لبدء هذا التفاعل .

ويعتبر الاستخدام الوحيد للتفاعل الاندماجي على وجه الأرض هو النموذج الاندماجي للقبلة النووية . ففي تلك القبلة يتم اشعال التفاعل الاندماجي بواسطة قبلة من النوع الانشطاري . وتكون درجة الحرارة داخل قبلة الانشطار من الكبر بحيث تمد النوى ذا Z المنخفضة بما يكفي من الطاقة لكي يندمج . والعمل يدور على قدم وساق في العالم كله لايجاد السبل العملية لانتاج والتحكم في التفاعل الاندماجي . فإذا نجحت تلك المساعي لأمكن استبدال التفاعل الاندماجي بالتفاعل الانشطاري في انتاج الطاقة النووية . على أنه ليس من المتوقع الوصول إلى هذا المصدر للطاقة قبل مرور سنوات عديدة قادمة لو كان هذا ممكنا على الاطلاق . وعلى الرغم من هذا فالتفاعل الاندماجي هو الذي يمدنا بطريق غير مباشر بمعظم الطاقة التي نحتاجها في الحاضر ، لأنه كما سنرى في الفصل القادم هو مصدر اشعاع الشمس .

٢٨ - ١١ الاشعاع : آثاره والكشف عنه

كلما تقدمنا في استخدام الطاقة النووية والمصادر الأخرى للاشعاع كلما زادت أهمية التأثيرات التي تحدثها الاشعاعات على الجسم البشري وعلى المواد التي نستخدمها . ويمكن تعلم القدر الكبير من المعلومات عن الاشعاعات ذات الطاقات العالية وذلك عن طريق دراسة الخواص النموذجية لجسيمات α وجسيمات β والنيوترونات واشعة γ . فتفاعل البروتونات مع الذرات ، مثلا ، شبيه جدا بسلوك جسيمات α وكذلك هناك تشابه بين المجموعات الأخرى التي ذكرت .

جسيم α كبير نسبيا ($4u$) ويحمل شحنة مزدوجة ($+2e$) . وعند قذف ذرة ما بهذا الجسيم فلنا أن نتوقع اصطدامه بالذرات بشكل متواتر . وقد وجد أن جسيمات α توءن الهواء - في الواقع - بسرعة كبيرة . فعند انتقالها في الهواء تقوم من حين لآخر بالتصادم مع ذرة ما وتطلق منها الكترونا حرا . (ان استخدام كلمة « تصادم » هنا ليس دقيقا تماما فحتى لو مر جسيم α الموجب بالقرب من ذرة ما فإن التجاذب الكهربائي بينه وبين الالكترون السالب يمكن أن يؤدي إلى التأين) .

ويمكن بطرق سندرسها مستقبلا أن نجعل مسار الجسيمات المشحونة في الهواء مرئيا . وفي الواقع يمكن عد حتى الأيونات المنفردة التي تنتجها هذه الجسيمات . وقد وجد أنه حتى جسيمات α ذات الطاقة المرتفعة لاتستطيع الانتقال في الهواء إلا لمسافة قصيرة قبل أن يتم إيقافها . فعلى سبيل المثال يبلغ مدى جسيمات α ذات الطاقة 7.7 MeV والصادرة عن راديوم C ، حوالي 7 cm في الهواء . ويكون المدى اقصر بكثير - بالطبع - في المواد الأثقل . ففي الألومنيوم يمكن لنفس جسيمات α أن تخترق سمكا قدره 0.004 cm فقط . وهكذا فجسيمات α يمكن إيقافها بسهولة تامة .

وتجدر الإشارة هنا إلى أن جسيم α لا يتوقف بعد تصادم واحد مع ذرة ما فقد بينت القياسات أن حوالى 35eV من الطاقة تفقد عند تأين كل ذرة في الهواء . ومن ثم يمكن لجسيم طاقته 7.7MeV أن يخلق حوالى 0.2 مليوناً من الأيونات قبل أن يخلد إلى السكون . وهذا العدد من الأيونات الناتجة من الجسيم أو بشكل آخر مدى الجسيم يمكن استخدامه كمقياس لطاقة الجسيم .

للبروتون خواص تشبه تلك التى لجسيمات α . وحيث أن كتلته تبلغ ربع كتلة جسيم α بينما شحنته نصف شحنة جسيم α لذا يكون من المتوقع أن البروتون لا يؤين الهواء بنفس القوة التى لجسيمات α . وقد اتضح أن هذا صحيح . ينتقل البروتون مسافة تتراوح بين 5 إلى 10 مرات أبعد مما ينتقله جسيم من جسيمات α وله نفس الطاقة ، داخل المادة . ويتضح من هذا أن البروتونات أقل كفاءة في تأين الذرات من جسيمات α بما يقل عن الخمس .

وتختلف جسيمات β عن الجسيمين اللذين ناقشناهما حتى الآن اختلافاً بينا . فكتلة جسيم β تصل إلى 1/1830 فقط من كتلة البروتون . وجسيم β الضارب يقدر على اقتلاع الإلكترون ذرى وتحريره ويكون هذا نتيجة لقوى التنافر في هذه الحالة . وعلى الرغم من اختلاف الآلية فليس هناك - في الحقيقة - فرق كبير بين التأثير النهائى للتأين الناشئ عن الضرب بجسيم سالب الشحنة أو موجبها بشرط أن يكون للجسيم نفس الكتلة . على أن هناك فرقاً كبيراً بين فعل جسيم β وجسيم α وذلك راجع إلى اختلاف كتلتهما . فتصادم جسيم α مع الإلكترون ما يشبه تصادم شاحنة وزنها 10,000kg بشاحنة دمية وزنها 2kg . وعلى هذا يمضى جسيم α في طريقه وكأنه لم يصدم أى شيء . أما في حالة تصادم جسيم β أو أى الإلكترون مع الإلكترون الآخر في ذرة ما فإن ما يحدث أشبه بتصادم جسيمين متساويين في الحجم . وجسيم β ينحرف بشدة إذا تعرض لتصادم مباشر . وقد يفقد معظم طاقة جسيم β في تصادم واحد وذلك اعتماداً على كيفية التصادم بين الجسيمات . على أن التصادم المباشر نادر الحدوث ولذا لا تكون انحرافات الجسيمات كبيرة عادة . وتقوم جسيمات β بعمل عدد قليل من التصادمات المؤينة وذلك لصغر شحنتها وكتلتها .

ومدى جسيمات β في الهواء أكبر بكثير من مدى جسيم α الذى له نفس الطاقة . وكتقريب مبدئى يمكن تقدير أن جسيم β ينفذ في المادة أبعد بمئات المرات عن جسيم α الذى له نفس الطاقة . وعلى الرغم من أن قطعة من الورق يمكنها إيقاف كثير من جسيمات α إلا أنه ليس بالمستغرب أن تمر جسيمات β خلال مواد ماصة أسمك بكثير من هذا . على أن جسيمات β إذا ما قورنت بالنيوترونات أو أشعة γ فإنها سهلة الإيقاف نسبياً .

ليس للنيوترونات أية شحنة وتقترب كتلتها من كتلة البروتون ولذا ليس هناك تنافر . أو تجاذب الكتروستاتي بين هذه الجسيمات والأجزاء المختلفة الأخرى في الذرة . ونتيجة لهذا لا يتعرض النيوترون للتصادم إلا نادرا . وعند التصادم المباشر مع الكترون أو نواة فإن التصادم يحدث قبل أن يلحظ أى اضطراب في مسار النيوترون . أما في حالة جسيم β أو α فهما يؤينان الذرة بمجرد الاقتراب منها وذلك لأن القوى الالكتروستاتية بين الشحنات تؤثر بشدة على الذرات على الرغم من عدم حدوث تصادم حقيقى وهذا مستحيل بالنسبة للنيوترون . ومن ثم فالنيوترون ذو نفاذية عالية على الرغم من أنه جسيم ضئيل الأثر التأينى .

لقد ناقشنا حتى الآن سلوك الجسيمات فقط ، أما أشعة γ فهي مختلفة تماما من حيث سلوكها عن كل الجسيمات وذلك لأنها اشعاعات كهرومغناطيسية ليس لها شحنة أو كتلة سكون . ومع هذا فقد ناقشنا بعض الحالات التى تتفاعل فيها أشعة X والضوء مع المادة وبالذات في التأثير الكهروضوئى ، وظاهرة كومبتون ، ولما كانت أشعة γ ليست الا أشعة x ذات أطوال موجية قصيرة ، فإن علينا أن نتوقع أن يكون لها نفس المميزات . وهذا في الحقيقة هو واقع الأمر .

إن شعاع γ ، وهو فوتون ، يفقد عادة كل طاقته في حدث واحد ، فيما عدا حالة استطارة كومبتون . عندما يمر شعاع من أشعة γ أو الفوتونات خلال غاز ما . فإن كثيرا من الفوتونات سوف توقف عند تصادمها مع الالكترونات الذرية واقتلاعها من الذرات . وهذا ببساطة هو التأثير الكهروضوئى بطبيعة الحال ، وكما نعرف من خبرتنا بأشعة X فالإشعاع الكهرومغناطيسى قصير الموجة أو ذو الطاقة العالية يكون نفاذا إلى أقصى حد . فأشعة X التى تنفذ وتمر خلال أجسامنا عند عمل صورة فوتوغرافية بالأشعة تعتبر ، بالمقارنة مع أشعة γ ، إشعاعا منخفض الطاقة نسبيا أى تكون عادة أقل من 0.10 MeV .

وعادة ماتصل طاقة أشعة γ المنطلقة من النوى إلى عدة ملايين من الالكترون فولت . وحيث أن قدرة أشعة γ على النفاذ هى بشكل عام أكبر للأطوال الموجية القصيرة فإنه يصبح واضحا أن أشعة γ عالية النفاذية . وأشعة γ ذات الطول الموجى القصير جدا أى ذات الطاقة العالية ، قادرة على النفاذ من الخرسانة التى يصل سمكها إلى عدة بوصات . وحيث أن الأثر الكهروضوئى يشكل القسم الأكبر من فقد أشعة γ من شعاع ما عند طاقات ليست بالعالية جدا ، لذا فالمواد التى تحتوى على عدد كبير من الالكترونات في وحدة الحجم تكون بالضرورة من أجود الماصات لأشعة γ . ولهذا السبب تستخدم العناصر الثقيلة جدا ، وعلى وجه الخصوص الرصاص ، في الوقاية ضد أشعة γ وأشعة X

من هذه المناقشة يتضح أن معظم هذه الأنواع من الإشعاع تسبب تأينا للذرات أثناء سيرها مما يشكل أساسا لمعظم الطرق المستخدمة لكشف هذه الأشعة .

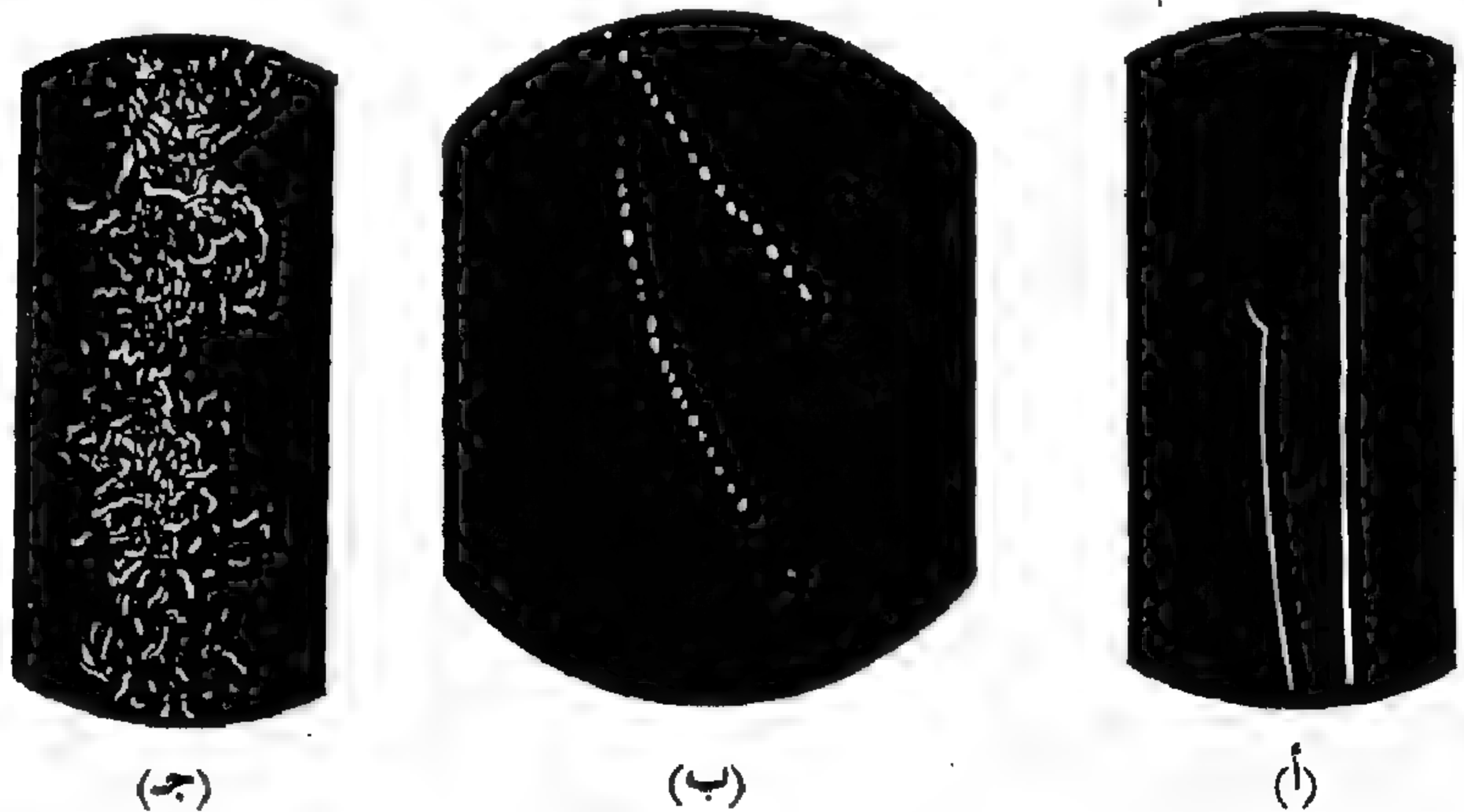
المستحلبات الفوتوغرافية : عندما يمر جسيم مؤين أو فوتون خلال طبقة المستحلب في لوح أو فيلم فوتوغرافي ، فإن الأيونات المتكونة تكون بمثابة المحال الهندسية لتكوين برش الفضة عندما يتم اظهار المستحلب . ونتيجة لهذا تترك الأيونات على طول مسار الجسيم سجلا فوتوغرافيا لمسار الجسيم .

الغرفة السحابية وغرفة الفقاعات : عندما يكون الضباب على وشك التكوين في بخار فوق مشبع ، أو عندما تكون الفقاعات على وشك التكوين في سائل فوق مسخن فإن القطرات والفقاعات تتكون بأفضلية عند الأيونات . ومن ثم تمكن رؤية الأيونات على طول مسارات الجسيمات على هيئة قطرات أو فقاعات . ويوضح الشكل (٢٨ - ١١) أنماطا نموذجية تم رصدها في غرفة سحابية . والأنماط المرئية في غرفة الفقاعات تكاد تكون مشابهة تماما لهذه فيما عدا أن أطوال المسارات أقصر كثيرا وذلك لاختلاف كثافتي السائل والغاز . وعادة مايطبق مجال مغناطيسي على الغرفة مما يجعل مسارات الجسيمات تنحني مما يوفر مزيدا من المعلومات حول الجسيمات .

عداد جيجر : تستخدم هذه النبيطة القابلة للحمل بشكل واسع في كشف الاشعاع ويوضح الشكل (٢٨ - ١٢) ، التركيب الأساسي لها . هناك فرق جهد مرتفع بين أنبوبة معدنية وسلك يقع عند محورها . تملأ الأنبوبة بخليط خاص من الغازات عند ضغط منخفض ، وعندما يدخل جسيم إلى العداد من خلال نافذة رقيقة هي المدخل ، فإنه يكون عددا من الأيونات . ويكون التيار الذي يسرى بسبب هذه

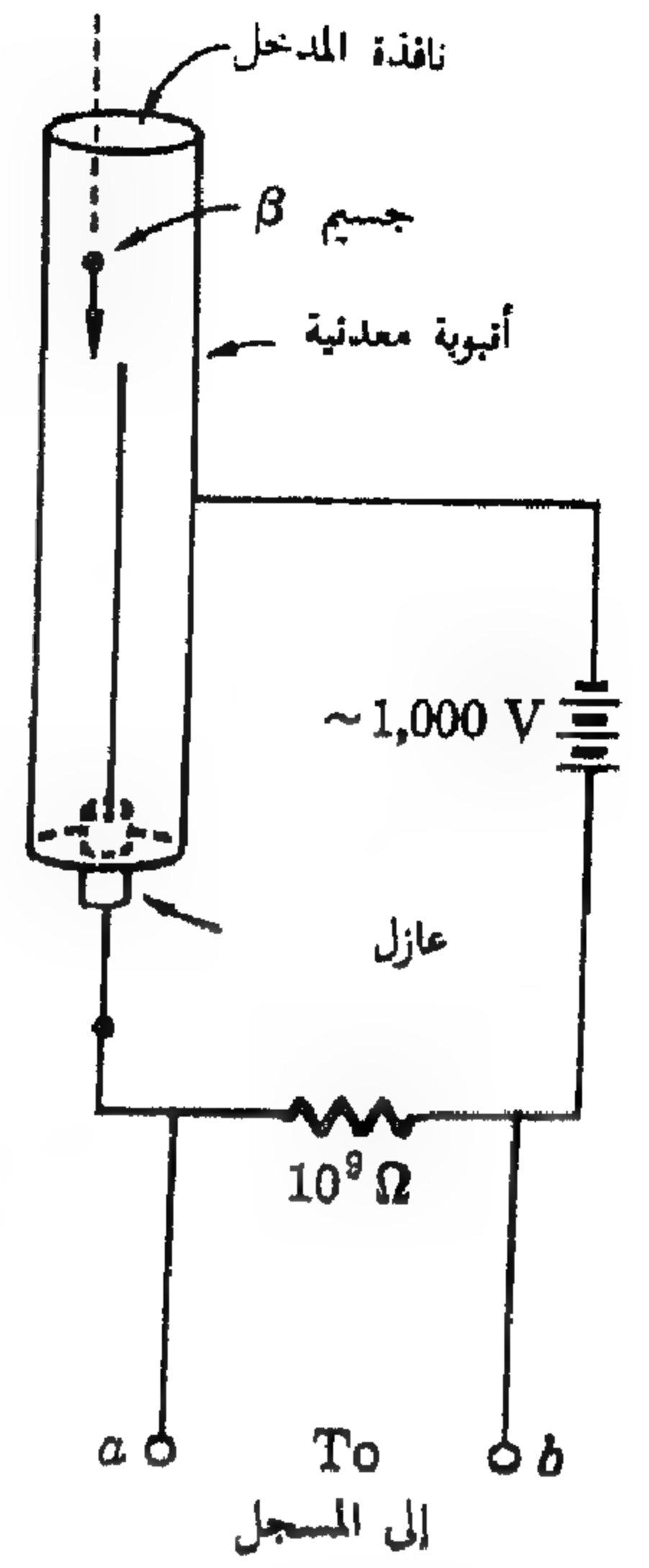
شكل (٢٨ - ١١)

(أ) أثر اثنين من جسيمات α (ب) أثر اثنين من جسيمات β (ج) لايترك شعاع γ أى أثر ولكن مساره واضح من مسارات جسيمات β التي تخلفت من الالكترونات التي طردت بواسطة أشعة γ .



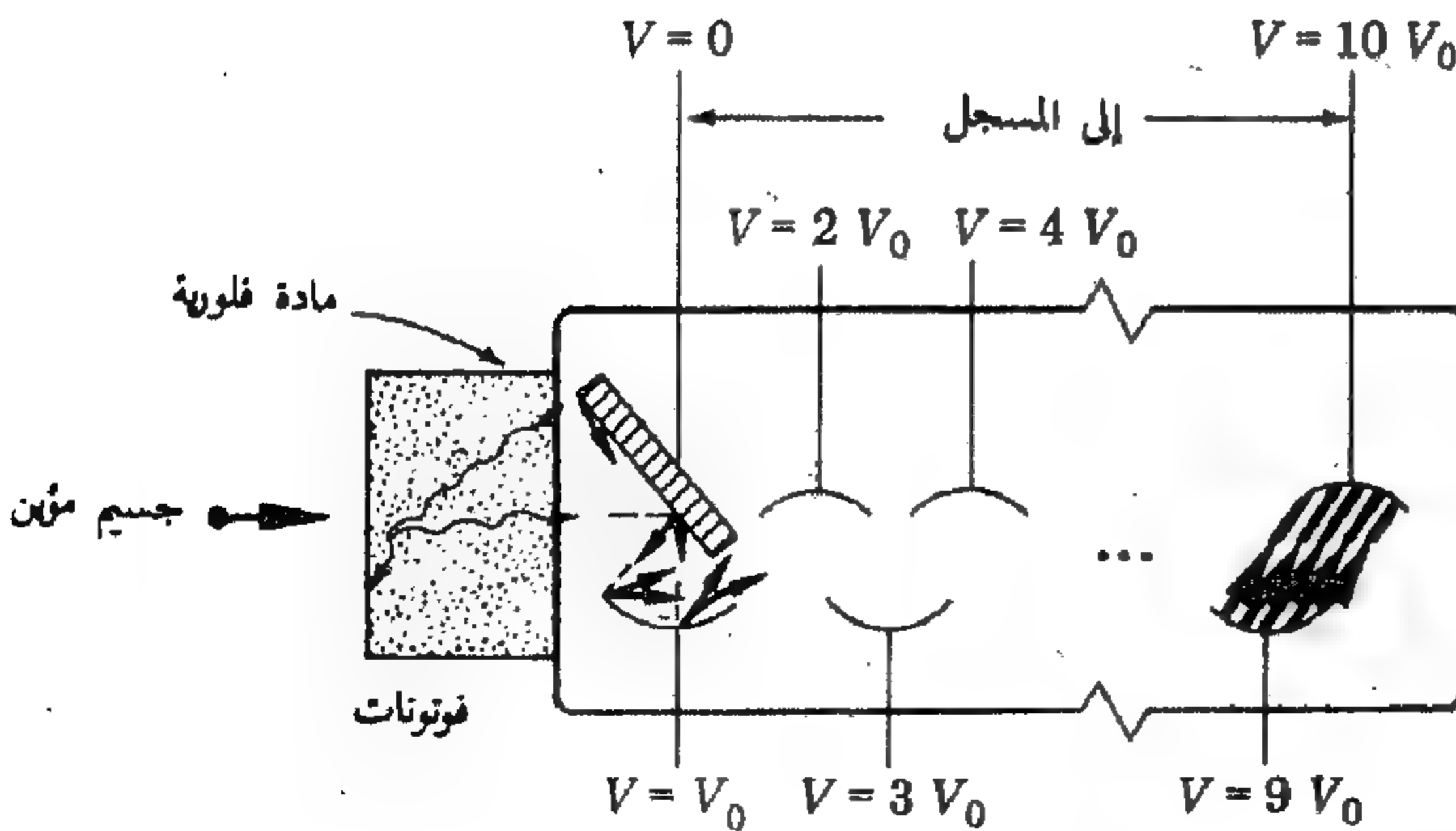
الأيونات بمفردها ضئيلا للغاية ولكن فرق الجهد المرتفع يجعل هذه الأيونات تنشئ تفريفا بداخل الأنبوبة وهذا تسمح الأنبوبة لحظيا بإمرار تيار . ولأسباب لانستطيع تتبعها هنا يتوقف هذا التيار خلال كسر صغير من الثانية . ومن ثم فكلما دخل جسيم إلى أنبوبة العد ، مرت نبضة للتيار خلال الدائرة . وأي نبضة تسجيل (كالزاعق وأجهزة القياس ، الخ) متصلة عبر الطرفين ab ستسجل حدوث هذه النبضات كلما حدث ذلك ، وهذا يتم عد الجسيمات التي تمر خلال أنبوبة العداد .

عداد الوميض . عندما يصطدم جسيم متحرك بسرعة بمادة فلورية فإن نبضة ضوئية تصدر عن المادة . وهذه الحقيقة هي أساس تكون الصور في أنبوبة التلفزيون وهي المبدأ الذي يبنى عليه عداد الوميض . هناك صمام ضوئي في الشكل (٢٨-١٣) يقوم باكتشاف نبضات الضوء ، ولكن نبضة الضوء الناشئة عن جسيم واحد تكون ضئيلة للغاية ، لذا يستخدم صمام ضوئي من نوع خاص يسمى مضاعف ضوئي ويوضح الشكل مبدأ عمل هذا الجهاز . وهو يستخدم - تماما كعداد جييجر - في كشف الاشعاع على نطاق واسع .



شكل (٢٨ - ١٢)
عداد جييجر

كاشفات الحالة الصلبة: ليست هذه النبضات سوى صمامات ثنائية شبه موصلة في الحالة الصلبة وكما قد تذكر فإنه لا يمر أي تيار خلال هذه النبضة في الاتجاه العكسي . على أنه حين يمر جسيم سريع الحركة خلال منطقة الوصلة بين جزئي شبه الموصل سالب النوع وموجب النوع ، فإن نبضة تيار تمر خلال الثنائي . وهذه النبضة تستخدم لعد الجسيمات بنفس الطريقة التي تم بها العد في النبضتين السابقتين .



شكل (٢٨ - ١٣)

يقوم الضوء الصادر من الوامض - في عداد الوميض - بابتعاث الالكترونات ضوئيا داخل الصمام الضوئي . تعمل الالكترونات في المرحلة الأولى خلال فرق للجهد مقداره V_0 ويقوم كل الكترون بتحرير عدد من الالكترونات الثانوية . وتستمر هذه العملية التضاعفية حتى تنتج نبضة تيار قوية عند الخرج ، وهي أكبر بكثير عما هو مبدئي بالشكل .

٢٨ - ١٢ الجرعة الاشعاعية

كما رأينا في القسم السابق فإن الاشعاع ذا الطاقات العالية قادر على تأيين الذرات ويمكنه أيضا تمزيق الجزيئات . والتلف الناشئ يشكل أهمية كبرى سنقوم بمناقشتها في المستقبل والآن لتتعلم شيئا عن الوحدات المستخدمة لوصف آثار الاشعاع .

تعريف

وحدات
الاشعاع
المتص

في كثير من تطبيقات الاشعاع تكون الآثار المفيدة (أو الضارة) للاشعاع متناسبة بالتقريب مع كمية الطاقة الاشعاعية الممتصة . ومن ثم تلزمنا وحدة لقياس الطاقة الممتصة من حزمة اشعاعية داخل المادة . وتسمى وحدة الطاقة الاشعاعية الممتصة $rad (rd)$ « الراد » وتعرف كما يلي : عندما يتعرض 1 g من المادة ويقوم بامتصاص 10^{-5} J من الطاقة الاشعاعية فإن الجرعة الممتصة تكون 1 rad . لاحظ أن ال rad هو مقياس للطاقة الممتصة في وحدة الكتلة .

وتؤدي الطريقة التي يعرف بها rad إلى أن نفس الشعاع ينتج عنه جرعات مختلفة في المواد المختلفة . فالشعاع الذي يمر خلال لحم آدمي سيمتص بصورة أقل مما يمتص في العظام ونتيجة لهذا ، إذا مر شعاع خلال شخص ما فإنه يسبب جرعة أكبر للعظام التي يمر خلالها أكثر مما يسبب للحم .

ولسوء الحظ ليس ال rad بالوحدة الجيدة لقياس أثر الاشعاع على البشر . وتكمن الصعوبة في أن الأنواع المختلفة للاشعاع تسبب أضرارا متباينة للأنسجة البشرية . فالجرعة التي تبلغ 1 rad من شعاع الكثراني تسبب ضررا مقداره عشر ما تسببه جرعة مساوية من شعاع من النيوترونات أو البروتونات . وعلى الرغم من أن وحدة rad تعتبر مناسبة لاجراء مقارنة بين تأثيرات نفس النوع من الشعاع إلا أنها تصبح غير ملائمة عند مقارنة أنواع مختلفة من الاشعاع ولذا يلجأ إلى استخدام وحدة أخرى .

يقاس التأثير البيولوجي للاشعاع الممتص بدلالة وحدة تسمى « رم » rem (rad equivalent-man) . وهي وحدة مقارنة بمعنى أنها تقيس الأثر وذلك بمقارنته بالأثر الذي يحدثه شعاع من أشعة X طاقته 1 MeV . حين يمتص 1 rd من أشعة X فإن كمية محددة من التلف البيولوجي تحدث . ويعرف ال rem بحيث أن جرعة مقدارها 1 rd تسبب تلفا بيولوجيا يكافئ جرعة مقدارها 1 rd من أشعة x ذات الطاقة 1-MeV .

تعريف

ولكي توضع وحدة rem بحيث ترتبط ارتباطا مفيدا مع وحدة rad فإننا ندخل كمية تسمى عامل الجودة (QF) للاشعاع . وهي عبارة عن نسبة يتم التوصل إليها كمايلي : يستخدم الاشعاع المطلوب دراسته لتشعيع المادة البيولوجية بحيث يؤدي إلى جرعة ممتصة مقدارها 1 rd . ثم تعرض نفس المادة البيولوجية للتشعيع من شعاع

من أشعة X طاقته 1 MeV إلى أن يحدث تلف بيولوجي له نفس المقدار ثم تسجل الجرعة الممتصة بوحدات rad . ويمكننا عندئذ تعريف عامل الجودة على أنه النسبة بين هاتين الجرعتين :

$$QF = \frac{\text{الجرعة المكافئة من أشعة X}}{1 \text{ rad من الاشعاع المطلوب دراسته}}$$

عامل الجودة
أو RBE

وكمثال نموذجي على هذا ، اعتبر أن جرعة مقدارها 20 rd من أشعة X كانت لازمة لتسبب نفس التلف الذي تحدثه جرعة مقدارها 1 rd من جسيمات α السريعة . وكان معامل الجودة لجسيمات α السريعة هو إذن 20 . (يسمى معامل الجودة QF دائما معامل RBE وهي اختصار الفعالية البيولوجية النسبية Relative Biological Effectiveness) ويحتوى الجدول (٢٨ - ١) على بعض القيم التقريبية النموذجية لمعامل الجودة QF . (بالرجوع إلى أفكار القسم السابق ، هل يمكنك بصورة كيفية تفسير لماذا كان لجسيمات α تأثير اتلافي أكبر مما للالكترونات ؟)

جدول (٢٨ - ١)
القيم التقريبية لمعامل الجودة QF (أو RBE)

نوع الاشعاع	قيمة QF التقريبية
أشعة X ، الالكترونات	1.0
النيوترونات والبروتونات السريعة	10
التأثير على العين	30
جسيمات α	10-20
النيوترونات البطيئة	4-5

يمكننا من تعريف ال rem ومعامل QF أن نكتب العلاقة التالية .

$$\text{الجرعة بوحدات rem} = (QF) \times (\text{الجرعة بوحدات rad})$$

لاحظ أن وحدات QF هي rem لكل rad .

مثال توضيحي ٢٨ - ٤ : ما هو حجم جرعة النيوترونات السريعة الذي يكافئ جرعة قدرها 50 mrd من النيوترونات البطيئة ؟

طريقة الحل لنوجد أولا عدد وحدات rem الموجودة في جرعة مقدارها 50mrd من النيوترونات البطيئة . لدينا

الجرعة بوحدات rem = (QF) × (الجرعة بوحدات rad)

حيث $QF = 4.5$. ومن ثم للنيوترونات البطيئة ،

الجرعة بوحدات rem =

$$\text{Dose in rems} = (4.5 \text{ rems/rd})(50 \times 10^{-3} \text{ rd}) = 0.225 \text{ rem}$$

من الممكن الآن أن نطبق نفس المعادلة على النيوترونات السريعة وذلك بوضع $QF=10$ وبوضع الجرعة بوحدات rem = 0.225 rem . ومن ثم للنيوترونات السريعة ،

$$0.225 \text{ rem} = (10 \text{ rems/rd})(\text{dose in rads})$$

مما يعطى 0.0225 rd على أنه الجرعة المطلوبة من النيوترونات السريعة .

تعريف على أن هناك وحدة أخرى يكثر استخدامها في وصف الاشعاع . وهذه الوحدة تسمى رونتجن (R) وتستخدم أساساً لأشعة X ، يعرف 1 R على أنه كمية الاشعاع التي تنشئ 2.1×10^9 زوجاً من الأيونات في 1 cm^3 من الهواء تحت الظروف العيانية .

٢٨ - ١٣ ائتلاف الاشعاعى

حيث أن الاشعاع يستطيع تمزيق الجزيئات فإنه يكون قادراً على ائتلاف المواد . وأحد الأنواع الشائعة من الإئتلاف الاشعاعى يكون بسبب الأشعة فوق البنفسجية في ضوء الشمس التي تؤدي إلى لفحة الشمس وذبغ الجلود ، حيث تقوم الفوتونات ذات الطاقة العالية بتمزيق جزيئات الجلد عند اصطدامها بها وتسبب الآثار التي تلاحظ بسهولة . ويكون الإئتلاف الناشئ في هذه الحالة على قدر ضئيل من الأهمية ، فمعظم الأشعة فوق البنفسجية للشمس تمتص في طبقة الأوزون الموجودة في طبقات الجو العليا ولذا لا يحتاج إلى تجنب التعرض لأشعة الشمس العادية . على أننا أصبحنا ندرك في السنوات الأخيرة أن استنفاد الأوزون من طبقاته بواسطة الكيماويات التي يصنعها البشر يمكن أن تؤدي إلى وصول كميات خطيرة من الأشعة فوق البنفسجية ، وعندئذ ينشأ خطر من أن الاشعاع فوق البنفسجى المتزايد الذى يصل بنا قد يؤدي إلى ارتفاع نسبة سرطان الجلد .

الخلفية
الاشعاعية

نحن نتعرض دائماً لاشعاعات أخرى بالإضافة إلى ضوء الشمس ، فكل المواد تقريباً تحتوى على كميات ضئيلة من المواد المشعة ، ولهذا يتعرض

جسدك حتما لمستوى منخفض من الخلفية الاشعاعية . ويتعرض الانسان في الغالب لخلفية اشعاعية تصل جرعتها إلى حوالى 0.15 rem كل سنة . ولنفحص الآن تأثيرات المستويات المختلفة لجرعة الاشعاع على الجسم .

الانسان
الاشعاعى
للشعر

تقوم المستويات المرتفعة للاشعاع والتي تغطي الجسم كله ، بتمزيق خلايا الدم بشكل خطير لايمكن معه الاحتفاظ بالحياة . وللجرعات التي يتعرض لها الجسم بأكمله والتي تزيد على 500 rem فإن الموت محتمل الحدوث . وحتى الجرعات التي تغطي الجسم كله وتصل إلى 100 rem يمكن أن تسبب أمراضا إشعاعية خطيرة وإن كانت غير قاتلة . أما التغيرات الطارئة على الدم فتحدث عند جرعات فى المدى من 30 rem وأكثر . وعند جرعات للجسم كله أقل من هذا تكون التأثيرات الإجمالية على الجسم أقل ظهوراً ومع هذا فهى تؤدى إلى نتائج ومضاعفات خطيرة .

والجرعات الاشعاعية حتى وإن صغرت تشكل خطورة شديدة عندما تصل إلى المناطق التناسلية فى الجسم ، فالجزئيات العملاقة فى أجسادنا والتي تحمل المعلومات التناسلية يمكن أن تتمزق عند أول تصادم اشعاعى . وإذا ما تمزق عدد كاف من هذه الجزئيات فإن معلومات تناسلية مشوهة سوف تنتقل إلى الأجنة كلما استمر نموها . ونتيجة لهذا تحدث حالات وضع شاذة . وعلى الرغم من أن هناك بعض الدلائل تشير إلى أن المستوى المنخفض للحالات الشاذة فى التكاثر قد يكون مفيدا للبشرية إلا أن معظم عيوب الوضع ليس مطلوبا .

ولهذا السبب يجب ألا يتعرض أى شخص فى عمر يسمح بالتناسل - لإشعاع غير ضرورى وخاصة فى منطقة الأعضاء التناسلية . ومن الطبيعى أن صورة أشعة X التى تؤخذ للذراع ، مثلا ، لاتشكل أى خطورة .

هناك إلى جانب الحالات الشاذة للوضع جانبان خطيران للمستويات المنخفضة للاشعاع . فهناك أثر سرطانى متأخر قد يكون موجودا وعلى الرغم من عدم ظهور السرطان مرة واحدة إلا أن المستويات المنخفضة للاشعاع قد تجعل السرطان ينمو بعد ذلك بعدة سنوات . والخطر الثانى ينشأ من أن الأطفال عرضة للاشعاع بشكل خاص . وحيث أن الطفل ينمو بسرعة لذا فأي تبدل فى الخلايا نتيجة للاشعاع ، قد تكون له مضاعفات خطيرة . ولذا يمتنع كثير من الأطباء عن وصف المسح بأشعة X للأطفال إلا فى حالات الضرورة القصوى .

وليست هناك حدود « آمنة » لتعرض الجسم للاشعاع . ويمكن فقط القول بأن الاشعاع يجب أن يظل عند أقل مستوى ممكن - داخل حدود المعقول ، فعلى سبيل المثال حيث أننا جميعا نتعرض لخلفية اشعاعية تبلغ حوالى 0.15 rem كل سنة ،

فليس هناك سبب لكى نمزق حياتنا فى تجنب جرعات اشعاعية أقل من هذه . وحتى بالنسبة لمن يعيشون فى الجبال ويتلقون جرعات اشعاعية أكبر بمقدار 0.05 rem عن أولئك الذين يعيشون عند مستوى البحر فإن الفرق ليس بالكبير الذى يضمن الانتقال . وفى التحليل الأخير فإن على الانسان أن يختار حلاً وسطاً بين الأمن الاشعاعى والاعتبارات الأخرى ، وعلى الرغم من هذا فالحد الأقصى للجرعات الاشعاعية المهنية قد قنن وحدد . وكقاعدة تقريبية تكون الجرعة السنوية القصوى فيما عدا للعينين والاعضاء التناسلية - حوالى 15 rem .

١٨ - ١٤ الجسيمات الأساسية

لقد قدمنا فى هذا الكتاب حتى الآن قوانين الطبيعة الواضحة تماماً ونتائجها . وعلى الرغم من أننا كنا نشير من آن إلى آخر إلى بعض مواطن الريبة الا أن هذه المواطن سطحية فى الغالب . ومع هذا فسننتقل الآن إلى موضوع حافل بالريبة والتخمين . وهو موضوع الجسيمات الأساسية التى تتواجد فى الطبيعة .

لقد كان الأمر يبدو بسيطاً منذ حوالى نصف قرن . فقد كنا نعرف الالكترن والبروتون والنيوترون والفوتون . وهذه الجسيمات كانت نعتبر وقتها هى الجسيمات الأساسية فى الكون ، ولكن بمرور السنين اكتشف الكثير من الجسيمات . فقد قامت المعجلات العملاقة بقذف بعض الجسيمات ببعض الآخر بكميات تحرك مذهلة ، وقد نتج عن ذلك انتاج (أو خلق) أنواع كثيرة من الجسيمات الجديدة التى تتراوح كتلة السكون لها بين الصفر وعدة وحدات كتلة ذرية وتتراوح أعمار النصف لها من أقل من 10^{-6} S إلى مالا نهاية ، ونكاد نوقن من أن جسيمات أخرى سوف تكتشف فى المستقبل .

وليس لدينا فى الوقت الحاضر أية براهين مرضية لتفسير هذه الجسيمات . فهناك نظريات تثبت العلاقات المتبادلة بين هذه الجسيمات إلا أن سرعة تواتر الاكتشافات لم تدع نظرية واحدة مقبولة لفترة طويلة دون أن يطرأ عليها تغيير أو امتداد ، ويمكن تكوين فكرة جيدة عن الموقف الراهن بالرجوع إلى مقال حديث حول الموضوع ويمكن قراءته * . وقبل أن تنتهى من قراءته ربما يكون قد أصبح قديماً ولا يصلح .

وعلى الرغم من هذه الفوضى إلا أن هناك بعض النتائج المعروفة بأنها ذات أهمية ، وتتضمن هذه النتائج حقائق أساسية صالحة للتطبيق على جميع الجسيمات . ولابد لنظرية نهائية - أو على الأقل مقبولة إلى حد ما - حول هذه الجسيمات أن تستفيد من هذه الحقائق ولنحاول أن نتعرف على هذه الحقائق الأساسية .

* S. L. Glashow, Quarks with Color and Flavor, Sci. Am., October 1975, p. 38.

١ - تخضع جميع الجسيمات لقوانين بقاء الطاقة وكمية التحرك الخطى والشحنة .
وعندما تنحل الجسيمات إلى جسيمات أخرى أو عندما تتكون جسيمات جديدة
أثناء تفاعل نووى فإن هذه القوانين ستظل صالحة .

٢ - تخضع جميع الجسيمات لقانون بقاء كمية التحرك الزاوى ، أى أن التدويم باق .
وعلاوة على ذلك فالتدويم مكمى . يمكن للجسم أن يتخذ كمية تحرك زاوى (مصورا
على أنه نتيجة لحركة التدويم حول محوره) قيمته $s(h/2\pi)$ حيث $s = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$.
أما h فهو ثابت بلانك . ويطلق على s تدويم الجسيم ويحتفظ كل جسيم بنفس
قيمة s الخاصة به دائما . فبالنسبة للإلكترون والبروتون والنيوترون تكون $s = \frac{1}{2}$.
وهذه الجسيمات تسمى جسيمات ذات تدويم $\frac{1}{2}$. أما الفوتون فتدويمه $s=1$
والميزونات لها تدويم صفري وهكذا . وفى أية عملية فإن كمية التحرك الزاوى للمواد
الداخلية فى التفاعل يجب أن يساوى تلك التى للنواتج .

٣ - العدد الباريونى (Baryon number) باق (محفوظ) . تسمى الجسيمات التى
لها تدويم قدره $\frac{1}{2}$ وكتلتها مساوية أو أكثر من كتلة البروتون باريونات . ولكل باريون
عدد هو إما $+1$ أو -1 يختار تبعا لطريقة ستوصف فى الفقرة التالية . وفى أية
عملية ، يجب أن يكون العدد الباريونى فى البداية هو نفسه عند النهاية .

٤ - لكل جسيم ، جسيم مضاد ، أى أنه لكل جسيم يوجد آخر يكون « مطابقا
له ولكنه مضاد » . فالإلكترون ليس موجودا فحسب وإنما مضاد الإلكترون أيضا
موجود ، ويطلق عليه بوزيترون وهو جسيم له نفس كتلة الإلكترون وشحنته مخالفة
وهى $+e$. وعندما يلتقى الإلكترون وبوزيترون يلاشى كل منهما الآخر . والبروتون أيضا
له جسيم مضاد وهو البروتون المضاد وكذلك فالنيوترون يقابله المضاد وهكذا . وعند
اختيار العدد الباريونى تحظى الجسيمات بالعدد $+1$ أما الجسيمات المضادة فيكون
من نصيبها العدد -1 .

٥ - تخضع كل الجسيمات ذات التدويم $\frac{1}{2}$ لإحصائيات فيرمى ديراك ونعنى بهذا
أنه لا يوجد جسيمان من هذه الجسيمات بنفس مجموعة الأعداد الكمية فى أية
مجموعة . ويفضى بنا هذا فى حالة الكثرونات الذرة إلى مبدأ باولى للاستبعاد الذى
سبقته مناقشته . على أن مبدأ الاستبعاد ينطبق أيضا على جميع الجسيمات ذات
التدويم $\frac{1}{2}$ التى توجد داخل النواة وكذلك فى التجمعات المختلفة للجسيمات .

هناك بالإضافة إلى هذه الحقائق ، حقائق أخرى ولكنها ليست بعد بنفس الدرجة
من اليقين ، فقد اقترحت بعض الكميات (المحفوظة) الباقية مثل ، الغرابة
(Strangeness) والتدويم النظائرى (Iso Spin) . وعلى الرغم من الصعوبة الكامنة فى
حل مشاكل الجسيمات الأولية إلا أن الفيزيائيين لم يفقدوا مرحهم فرما ، وبدون وعى

منهم، وعلى سبيل الاحتفاظ بالروح العالية يقومون بوصف خواص الجسيمات بمصطلحات غريبة مثل « الغرابة » « Strangeness » و « الرقية أو الفتنة » « Charm » و « اللون » « Color » وهكذا. وعلى الرغم من هذا فمساعدتهم هي أعلى مستوى للابحاث وجهدهم هو الجهد الأوفر . فدراسة الجسيمات الأساسية تسير أعمق أغوار كوننا وتتوقع ظهور وسيلة فعالة لاعادة الترتيب والنظام إلى حالة الفوضى الراهنة .

ملخص

تحتوي نواة ذرة ما عددها الذرى Z وكتلتها الذرية A على Z بروتونا و $A-Z$ نيوترونا . ويعطى نصف قطرها بالعلاقة التقريبية $R = 1.2 \times 10^{-15} A^{1/3} \text{ m}$

وعلى المستوى الذرى ، تكون كتلة ذرة الكربون 12 هي 12u تماما ، أما كتل البروتون والنيوترون فقريبة جدا من 1.0u .

تمثل نواة عنصر ما X عدده الكتلى A وعدده الذرى Z بالرمز A_ZX . وتكون للنواتان اللتان لهما نفس Z وتختلفان في A نظيران لنفس العنصر وهما يعملان بنفس الطريقة في التفاعلات الكيميائية وإن كانا يختلفان في عدد النيوترونات الموجودة بنواتيهما . وكتل النظائر (بوحدات الكتلة الذرية) قريبة من الأعداد الصحيحة أما الكتلة الذرية المذكورة في الجدول الدورى فهي متوسطات النظائر الموجودة في الطبيعة .

لجميع النوى كتل أقل من مجموع الكتل المكونة لهذا النوى من نيوترونات وبروتونات. وكمية الكتلة Δm المفقودة في تكوين النواة ترتبط بطاقة الترابط (ط . تر) للنواة خلال العلاقة

$$\text{ط . تر} = \Delta m c^2 . \text{ وفي الواقع يجب أن تخلق هذه الكتلة المفقودة عندما تنفصل النواة إلى أجزاء متناثرة .}$$

تتميز نوى العناصر التى لها Z متوسطة بأن طاقة الترابط لكل نوية تكون أقصى ما يمكن ولهذا تنطلق الطاقة في تفاعلات الانشطار والاندماج . تستخدم المفاعلات النووية تفاعلات الانشطار في توليد الطاقة .

تكون جميع العناصر التى لها $Z \geq 83$ ذات فعالية إشعاعية وتتبع عند انحلالها قانونا أسيا . ويسمى الوقت الذى يستغرقه نصف النوى لكى ينحل بعمر النصف . وهو يعطى بالمعادلة ، عمر النصف $= 0.693/\lambda$ حيث λ هي ثابت الانحلال . وعدد النوى N الذى ينحل خلال فترة زمنية مقدارها Δt يرتبط بعدد النوى N القابل للانحلال بالمعادلة $\Delta N = \lambda N \Delta t$.

وتصدر المواد المشعة الموجودة في الطبيعة جسيمات α و β وكذا أشعة γ ، وجسيمات α هي نوى هليوم ، أما جسيمات β فهي إلكترونات وأشعة γ هي نفسها كأشعة X . ويمكن ترتيب هذه الجسيمات ترتيبا تنازليا لقدرتها على التأين وتصاعديا حسب قدرتها النفاذية كالتالى ، جسيمات α ثم β ثم أشعة γ .

تقوم القوى النووية بامساك النويات معا . وعلى عكس القوى الكهربائية وقوى الجذب فإن القوى النووية تعتبر ذات مدى قصير ، إذ أنها تؤثر على مسافات أقل من 10^{-14} m تقريبا . على أنها عند هذه المسافات تكون أكبر بكثير من قوى كولوم .

تقاس جرعة الاشعاع الممتص بدلالة وحدات تسمى راد (rad) . وهذه الوحدة أى واحد rad ، تكافئ جرعة ممتصة مقدارها 10^{-5} J في كل واحد جرام من المادة . والجرعة معبرا عنها بوحدات rem = (الجرعة بوحدات rad) (QF) حيث يقيس عامل الجودة (QF) الفعالية البيولوجية النسبية للاشعاع المعنى .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتي :

١ - أن تذكر القيمة التقريبية لنصف قطر النواة .

٢ - أن تميز بين العدد الذري Z والعدد الكتلي الذري A وأن تنسبهم إلى عدد البروتونات والنيوترونات في النواة .

٣ - أن تفسر رموزا مثل ${}^6_3\text{Li}$.

٤ - أن تشرح المقصود من لفظ نظير .

٥ - أن تعرف وحدة الكتلة الذرية وأن تذكر الكتلة التقريبية للبروتون والنيوترون بدلالة هذه الوحدة .

٦ - أن ترسم علاقة النقص الكتلي لكل نوية كدالة في Z .

٧ - أن ترسم العلاقة بين طاقة الترابط لكل نوية و Z وأن تشرح لماذا كانت هناك علاقة بين هذا الرسم والرسم المذكور في ٦ .

٨ - أن ترسم العلاقة بين N و t لمادة ذات فعالية إشعاعية وأن تشير إلى موقع عمر النصف على الرسم . أن تحسب نسبة المادة التي لم تتحل بعد فترة من الزمن مساوية لعدد صحيح من أعمار النصف .

٩ - أن تعرف كل كمية في المعادلة $\Delta N = \lambda N \Delta t$ وأن تستطيع استعمال هذه المعادلة في مواقف بسيطة . أن تذكر العلاقة بين λ وعمر النصف .

١٠ - أن تعرف جسيم α وجسيم β وشعاع γ وكذا البوزيترون .

١١ - أن تكتب معادلة التفاعل النووي لنواة معينة تقوم باطلاق واحد مما يلي : جسيم α ، جسيم β ، شعاع γ .

١٢ - أن تعد رسما بيانيا كالذي في الشكل (٢٨ - ٦) وذلك لمسلسلة قد أعطيت النواة التي تبدأ بالانحلال فيها وكذا الجسيمات المنطلقة (α ، β ، γ) .

١٣ - أن تقارن بين القوة النووية وقوى الجذب وقوى كولوم من حيث الشدة والمدى واعتماد كل منها على .

١٤ - أن تشرح لماذا كان على تفاعل الانشطار النووي أن يطلق طاقة حسب الرسومات البيانية بين النقص الكتلي وطاقة الترابط . أن تذكر ما المقصود بتفاعل الانشطار المنسلل وأن تربط هذا بسبب أن ${}^{235}\text{U}$ وليس ${}^{238}\text{U}$ هو الذي يستخدم في القنبلة النووية .

١٥ - أن ترسم رسما بيانيا تخطيطيا لتفاعل قوى نووية مينا قضبان الوقود ومهدىء النيوترونات وقضبان التحكم والمبادل الحرارى والخرج إلى التوربينات ، وأن تشرح وظيفة كل من هذه الأجزاء .

١٦ - أن تشرح لماذا كان على التفاعل النووي الاندماجي أن يطلق طاقة حسب الرسومات البيانية بين النقص الكتلي وطاقة الترابط . وأن تذكر لماذا كان تفاعل الاندماج أكثر صعوبة في التنفيذ في مفاعل معمل عن تفاعل الانشطار .

١٧ - أن تقارن بين المدى والأثر التأيني لاشعاع α ، β ، γ حينما تمر خلال المادة .

١٨ - أن تعرف كل من الآتي : « راد » rad ، « رم » rem ، عامل الجودة (أو الفعالية البيولوجية النسبية) ، وأن تذكر المعادلة التي تربط بين هذه الكميات الثلاث . أن تستخدم هذه المعادلة في مسائل بسيطة كالتي في المثال التوضيحي (٢٨ - ٤) .

١٩ - أن تصف مايلي : عداد جيجر ، عداد الوميض ، الغرفة السحابة وغرفة الفقاعات .

٢٠ - أن تفسر لماذا كان الاشعاع ضارا بالبشر ، وأن تشير في تفسيرك إلى أى أجزاء الجسم وأى أنواع البشر هم الذين يجب أن يحظوا بحماية زائدة من الاشعاع .

٢١ - أن تذكر خمسة قوانين للبقاء تخضع لها جميع الجسيمات الأساسية في جميع التفاعلات .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

العدد الذرى Z ، عدد الكتلة الذرى A .

النظير

وحدة الكتل الذرية u

النقص الكتلى ، طاقة الترابط

مشع ، عمر النصف

ثابت الانحلال ، $\Delta N = \lambda N \Delta t$

وحدة الكورى

جسيم α ، جسيم β شعاع γ ، البوزيترون .

القوة النووية

الانشطار ، التفاعل المتسلسل

المفاعل النووى

تفاعل الاندماج

راد (rad) ، رم (rem) ، (QF) أو (RBE)

يكون الاشعاع خطيرا بشكل خاص لأولئك الذين في عمر يؤهلهم لحمل أطفال وكذا للأطفال

أسئلة وتحقيقات

١ - ماعدد النيوترونات في النواة $^{39}_{19}K$ ؟ وماعدد البروتونات ؟ وكم الكترونات تحتوى هذه الذرة ؟

٢ - لماذا يعتبر الكيميائيون النظائر المختلفة لعنصر ما على أنها نفس العنصر بالرغم من أن النوى ليس هو نفسه ؟

٣ - هل يمكن أن تختلف الأطياف البصرية لكل من ذرات ^{35}Cl و ^{37}Cl بشكل أساسي ؟ اشرح .

٤ - على الرغم من أن جسيم α يتجاذب مع الالكتران بدلا من التنافر معه إلا أنه قادر على تحرير الكترون من الذرة دون اللجوء إلى تصادم مباشر . اشرح .

٥ - لماذا يكون سمك معين من الرصاص أحسن امتصاصا لأشعة طاقتها 1 MeV (من جسيمات α و β وأشعة γ) من كمية من الماء لها نفس السمك ؟ لماذا يعتبر الماء حاجزا واقيا ضد النيوترونات أفضل من الرصاص ؟

٦ - للنظير ^{102}A المنتج صناعيا عمر نصف مقداره 37 min وهو ينحل بطريقتين متبادلتين . فجزء من النوى يطلق الكترونات موجبا أو بوزيترونات والجزء الباقي يقوم باصطياد الالكترونات من المدار الأول لبوهر ويحتويه داخل النواة . كيف يمكن اعتبار الطريقتين متكافئتين ؟ ما الذى يمكن ملاحظته فى المعمل عند حدوث كل من هاتين العمليتين ؟

٧ - يعتبر التريتيوم 3H أحد نظائر الايدورجين ، وكتلته الذرية 3.016 بينما الكتلة الذرية لـ 1H هي 1.00867 ، مالىذى يمكن التنبؤ به نحو استقرار التريتيوم ؟ كرر المسألة بالنسبة لـ 2H ، الديوتيريوم الذى تبلغ كتلته 2.0141 .

٨ - قبل اجراء مسح بأشعة X على القناة الهضمية ، يجب على المريض أن يشرب محلولاً من أحد مركبات الباريوم . لماذا ؟

٩ - عندما تلتقط صورة فوتوغرافية بأشعة X لذرعة شخص ما فإن العظام ترى بوضوح فى الصورة . لماذا تظهر العظام بهذه الطريقة ؟ على الرغم من أن الذراع لا يكون أسماك مايمكن حيث توجد العظام .

١٠ - حفظت كمية صغيرة من الراديوم بإحكام داخل أنبوبة زجاجية مفرغة . عندما كسرت الأنبوبة فيما بعد لفتحها وجد أنها تحتوى على بعض الغاز فقط ، وقد بين مطياف الكتلة أن الغاز يحتوى على فصائل ذات وزن جزيئى منخفض جدا وكذا على فصائل ذات وزن جزيئى مرتفع جدا . ماهذه الفصائل ؟ قدر الكثرة النسبية لهم .

١١ - تبلغ كتلة الالكتران 0.000549 بوحداث الكتل الذرية أما كتلة البروتون فتبلغ 1.00728 والنيوترون 1.00867 بنفس الوحدات . هل يكون مجديا أن يتحد الكترون وبروتون عند السكون ليكونا نيوترونا ؟ اشرح . وهل يكون الأمر ذا قيمة إذا كانا قريبين من بعضهما البعض أو على مسافة كبيرة عندما يكونا ساكنين ؟

١٢ - لماذا كان بدء تفاعل اندماجي أصعب بكثير من بدء التفاعل الانشطاري ؟

١٣ - هل توجد أية امكانية لدمج نواتين صغيرتين بدون جعلهما يصطدمان بطاقة عالية جدا ؟ برر اجابتك .

١٤ - ينتج المفاعل النووي طاقة هي بالضرورة على هيئة حرارة . اشرح كيفية تولد هذه الحرارة نتيجة للانشطار النووي .

١٥ - يظهر من تفاعلات الاندماج والانشطار أن هناك طاقة تخلق . كيف يمكن التوفيق بين هذه الحقيقة مع مقولة أن الطاقة لا تخلق ولا تفنى ؟

١٦ - من الممكن لشخص يعمل بأشعة X أن يحرق يده بدرجة كبيرة تستلزم بترها وقد يعانى حتى بعد هذا من الكثير من المضاعفات . ومع هذا فإن مزيدا من التعرض لأشعة X قد لايسبب ضررا ملحوظا لجسم الانسان ولكنه قد يسبب تشوها خطيرا لواحد من نسله . اشرح السبب .

١٧ - يشعر كثير من العاملين في مجال الأشعة أن النساء اللاتي في مرحلة اليأس يمكنهن التعرض بأمان لأشعة X أكثر مما يمكن أن تحتمله امرأة صغيرة . كيف يمكن تبرير هذا الرأي ؟

١٨ - تستخدم أشعة X (اللينة) ذات الطاقة المنخفضة في علاج سرطان الجلد ، بينما تستخدم أشعة X (القاسية) ذات الطاقة العالية في علاج السرطان الموجود داخل عمق الجسم . لم لاتستخدم أشعة X اللينة للغرض الأخير على الرغم من أنها تستطيع أن تنفذ بسهولة إلى مناطق السرطان لقتلها ؟

مسائل

١ - (أ) قدر نصف قطر البروتون و (ب) عين متوسط كثافته بوحداث الجرام لكل سنتيمتر مكعب .

٢ - أحسب نصف القطر التقريبي للنواة ^{235}U وكذا كثافتها بوحداث الجرام لكل سنتيمتر مكعب .

٣ - في مطياف للكتلة كالذى في الشكل (٢٨ - ١) وجد أن m لذرة ^{12}C هي 10.00 cm . كم تبلغ n بالنسبة لـ ^{16}O ؟ اعتبر أن الشحنات متساوية وكذا جهود التعجيل .

٤ - يحتوى البوتاسيوم الموجود في الطبيعة على نظيرين فقط ، وكتلة احدهما الذرية هي 38.975 ويشكل 93.4 في المائة من المجموع ، أما الآخر وهو يشكل 6.6 في المائة فكتلته 40.974 u . احسب من هذه البيانات الكتلة الذرية التى يدونها الكيميائيون في الجدول الدورى .

٥ - يوجد نظيران من النحاس التجارى . يشكل الأول 70 في المائة من المجموع وكتلته الذرية 62.96 u . ويعزى الكيميائيون كتلة مقدارها 63.58 u للنحاس . ماهى كتلة النظير الثانى ؟

٦ - لجسيم α الذى يطلقه الراديوم طاقة مقدارها 4.79 MeV . احسب سرعة الجسيم :

٧ - هناك متسلسلة اشعاعية بالاضافة إلى تلك التى في الشكل (٢٨ - ٦) وهى متسلسلة الثوريوم وتبدأ بعنصر ^{232}Th وتطلق على التوالى جسيم α واحد ثم جسيمان β ثم أربعة α ثم واحد β ثم واحد α . ماهو الناتج النهائى لهذه المتسلسلة ؟

٨ - ماهو الكسر التقريبي الذى يتبقى من عينة من الراديوم تركت لمدة 16,000 yr ؟

٩ - تحوى أمبولة دقيقة من غاز الرادون على 3.0×10^{12} ذرة رادون . وعمر النصف للرادون هو 3.8 days . (أ) ماهو عدد التفتتات التى تحدث في الثانية داخل الأمبولة ؟ (ب) ماهو النشاط الاشعاعى مقدرا بالكورى لهذه العينة ؟

١٠ - تستخدم المواد المشعة في الدهان الذى تدهن به الأرقام في الساعات حتى يمكن رؤية الوقت في الظلام . وقد استطاع طالب أن يقدر من قياسات بعدد جييجر أن هناك 1000 تفتت يحدث كل ثانية عند وجه الساعة . ماهو عدد وحدات كورى من النشاط الاشعاعى توجد في الساعة ، إذا اعتبرنا قياسات الطالب صحيحة ؟

١١** - للكوبالت ^{60}Co عمر نصف مقداره 5.3 yr ماهى كتلة 1 Ci من هذه المادة ؟ (يشع ^{60}Co أشعة γ ويستخدم على نطاق واسع في المجالات الطبية والصناعية حيث تتطلب أشعة X عالية النفاذية) .

١٢ - تبلغ كتلة أكثر نوى الليثيوم وفرة 7.014 u . باستخدام الكتل 1.0073 u و 1.0087 u للبروتون والنيوترون على الترتيب ، احسب طاقة الترابط في الليثيوم بوحدات الإلكترون فولت .

١٣ - تعرف كتلة ذرات الكربون 12 على أنها 12.00 u تماماً ، فإذا ما طرحنا كتلة الكتروناتها الستة لوجدنا أن كتلة نواة ^{12}C تبلغ 11.997 u . باستخدام البيانات الواردة في المسألة ١٢ ، احسب أقل طاقة ممكنة تلزم لتفريق هذه النواة إلى مكوناتها من النيوترونات والبروتونات .

١٤ - باعتبار التفاعل النووى التالى



حيث تدل الأرقام على كتل النوى بوحدات الكتلة الذرية . ماهى أقل طاقة يجب أن تكون لجسيمات α حتى يصبح التفاعل ممكن الحدوث ؟

١٥ - عندما تطلق نواة ما شعاع γ طاقته 2.0 MeV فما مقدار تغير كتلة النواة ؟

١٦** - يصدم نيوترون سرعته 10^6 m/s ذرة ديوتريوم ساكنة (ايدروجين ثقيل ، ^2_1H) صدمة مباشرة أثناء تصادم مرن تام (المرونة) . (أ) اوجد سرعته بعد التصادم . (ب) أعد المسألة لو أن ذرة الديوتيريوم استبدل بها ذرة أكسجين ، $^{16}_8\text{O}$ لاحظ أن النوى الخفيف هو الأكثر فعالية في إبطاء النيوترونات .

١٧ - يمكن تقسيم الخلفية الاشعاعية في مدينة دالاس بولاية تكساس إلى نوعين . فهناك جرعة سنوية تبلغ حوالى 30 mrd من إشعاع γ وحوالى 1.5 mrd من الجسيمات التى يبلغ QF لها 20 تقريباً . ماعدد وحدات rem التى يتعرض لها من يقيم في دالاس سنوياً نتيجة لهذه الخلفية ؟

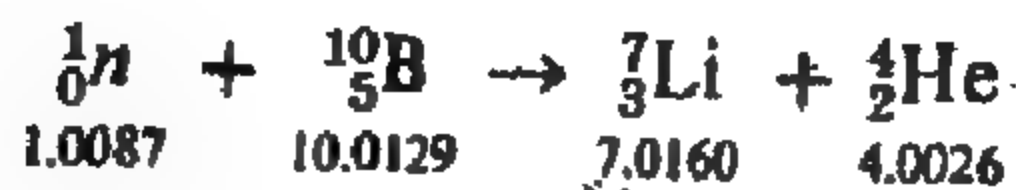
١٨ - يعتقد بعض مراجع الثقة أن الجرعة القصوى المسموح بها لأيدى الانسان يجب أن تكون 70 rem/yr . عبر عن هذه الجرعة بوحدات rad إذا كان الاشعاع المعنى هو (أ) أشعة X ، (ب) أشعة γ ، (ج) الكترونات سريعة ، (د) نيوترونات سريعة .

١٩** - افترض أن 1 kg من الديوتيريوم (ايدروجين الثقيل ^2_1H) قد جمع ليكون 1 kg من الهليوم تبعاً للتفاعل ،



حيث تبين الأرقام الكتل الذرية . (أ) مامقدار الطاقة المحررة ؟ إذا كانت الحرارة النوعية للهليوم المحصور هى $0.75 \text{ Cal/(g)(}^\circ\text{C)}$ فما مقدار الارتفاع في درجة حرارته إذا أمد بهذه الكمية من الطاقة ؟

٢٠** - يتم كشف النيوترونات عادة بالسماح لها بأن تقتصر بواسطة نوى البورون . والتفاعل الذى يحدث هو



حيث أعطيت كتل الذرات دون أن يطرح منها كتل الإلكترونات . (حيث أن عدد الإلكترونات على كلا الجانبين هو نفسه فإن هذا لن يسبب أية مضاعفات . لماذا ؟) وتظهر الطاقة الناتجة من هذا التفاعل على هيئة طاقة حركة (ط . ح) للنواتج . ثم يتم عد أيونات الهليوم سريعة الحركة (جسيمات α) وذلك باستخدام الطرق العادية . احسب سرعة جسيم α باعتبار المواد الداخلة في التفاعل ساكنة بالضرورة . قلميح : احسب الطاقة المحررة في التفاعل ثم اكتب قوانين بقاء الطاقة وكمية التحرك .

الفصل التاسع والعشرون

فيزياء الكون

عنيت الفصول السابقة بأصغر اللبّات الموجودة في الطبيعة وهي الذرات والنوى والجسيمات الأساسية . وسنحول انتباهنا الآن إلى الاتجاه الآخر في الموضوع وهو الكون نفسه . سنفحص في هذا الفصل الملامح الرئيسية للكون وبعض النظريات التي تبحث في أصله .

٢٩ - ١ الشهاب الأولى المتوهج

يهم العلماء باكتشاف كيفية سلوك الطبيعة ؛ ثم يقومون بالربط بين هذه الاكتشافات حتى يمكن ايجاد نوع من النظام بين العديد من الحقائق التي تبدو وكأنه لاعلاقة بينها . ثم يصنع العلماء النظريات التي تفسر هذا النظام ويمضون في اختبار صحة النظريات عن طريق التنبؤ بنتائج تجارب لم تجر بعد . والنتائج العملية في كل العلوم هي بمثابة القلب وبدونها لا يكون العلم علما بل ضربا من التخمين أو الفلسفة أو اللاهوت .

وعلم الفيزياء الفلكية يواجه عوائق جمة من نقص مقدرتنا على اجراء التجارب الحاسمة حقا . وأهم الأحداث على الإطلاق وهو نشوء الكون ، قد حدث منذ العديد من بلايين السنين ولا يزال مستمرا . وبالطبع لا يمكن تكرار هذه العملية وكل معرفتنا عن أصل الكون يجب أن تلتقط من هذه « التجربة » الوحيدة والتي لا نملك حيالها أى تحكم . بل أن كثيرا من البيانات الهامة كان من الواجب تسجيلها منذ بلايين السنين وحتى قبل ظهور الجنس البشرى . وكثيرا من المعلومات لن يصبح متاحا قبل مرور البلايين من السنين في المستقبل . وليس لدينا بديل عن العمل بما لدينا من البيانات القليلة التي نحصل عليها بالطرق المحدودة المتاحة . ولهذا فإن معظم ما سيقال في هذا الفصل يجب تناوله بشيء من الحرص فكثير من تفسيراتنا قد يتضح فيما بعد أنها غير صحيحة .

لقد كانت هناك إلى وقت قريب عدة نظريات متنافسة حول التاريخ المبكر للكون أما في الوقت الحالى فلا توجد إلا نظرية واحدة مقبولة على نطاق واسع وهي التي صاغها - بصورتها الحالية - ج . جامو عام ١٩٤٨ . وتسمى هذه النظرية نظرية الانفجار العظيم . وتصور هذه النظرية الكون كله في البداية على أنه كان يقع داخل كرة يبلغ قطرها قدر قطر الشمس عشر مرات تقريبا . وقد يعترض البعض أن هذا محال ولا يمكن حشد كل مادة الكون داخل مثل ذلك الحيز الضئيل . على أنه عند تذكر أن الذرة مكونة من فراغ ضخم فإن الحديث عن كبر حجم المادة يصبح غير ذى موضوع .

نظرية الانفجار
العظيم

فقد تعلمنا من المسألتين ١ و ٢ في الفصل السابق ، مثلا ، أن الكثافة داخل النواة تبلغ $2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$. ولما كانت التقديرات الحالية لمتوسط كثافة الكون تقع في المدى بين 10^{-29} ، 10^{-31} g/cm^3 بينما يعتقد أن نصف قطر الكون قد يصل إلى 10^{10} سنة ضوئية تقريبا* ، لذا فالكتلة الاجمالية للكون من المحتمل أن تقع في مدى

* لعلنا نذكر أن السنة الضوئية الواحدة هي المسافة التي يقطعها الضوء في سنة واحدة ، أى $9.46 \times 10^{15} \text{ m}$.

عدة عشرات من المقدار 10^{54} g . وعند حشد هذه الكتلة كلها في حجم يبلغ عشرة أضعاف قطر الشمس سيؤدي إلى كثافة مقدارها 10^{18} g/cm³ بالتقريب وهذه الكمية قريبة من الكثافة داخل النواة (التي يمكن اعتبارها هي أيضا مكونة من فراغ ضخم) إلى درجة لا يمكن معها التخلي عن المبدأ الأصلي للنظرية بناء على كبر الكثافة المتضمنة . وعند هذه القيم الهائلة للكثافة فإن المادة كما نعرفها لا يمكن أن توجد ومن المؤكد أنه في تلك المرحلة لم يكن هناك ذرات أو جزيئات أو حتى نوى ، أما الطاقة فكانت من الكبر بحيث تصل درجة الحرارة داخل الشهاب إلى 10^{12} K على الأقل . وعند هذه الطاقات الهائلة لابد أن يتمزق نوى جميع الذرات ، إذ أن طاقات الترابط تناظر شطرا صغيرا جدا من الطاقة الحرارية عند درجة الحرارة تلك .

نستطيع ، من ثم ، تصور الكون على أنه كان عبارة عن شهاب ساخن إلى أقصى درجة عند البدء (ليس هذا إلا فرضا بطبيعة الحال) . وقد كان بمثابة مرجل للطاقة والشحنة . ولو فرض أنه كانت هناك جسيمات لكانت ذات طاقات عالية جدا مما لا يمكننا انتاجه إلا داخل المعجلات العملاقة . وبمعنى أو آخر يمكن تصور الشهاب على أنه غاز ساخن إلى أقصى حد وهو مكون من جسيمات وفوتونات ذات طاقات عالية ، ومثله مثل أى غاز بدأ ذلك الشهاب في التمدد .

وعندما أخذ الشهاب في التمدد فإن شغلا كان يبذل ضد قوى الجاذبية . كان الضغط الهائل داخل الشهاب يسبب شغلا مبدولا خلال التمدد ضد قوى الجذب الهائلة التي تمسك بأجزاء الشهاب معا . ونتيجة لهذا أخذت مادة الشهاب تفقد طاقة حركة حرارية كلما ازدادت طاقة وضع الجاذبية . وبناء عليه أخذت درجة حرارة الشهاب في الهبوط بسرعة مع ازدياد التمدد . ومع هذا كانت عملية التمدد تقوم بتعجيل المادة المنطلقة خارجا إلى سرعات تقترب من سرعة الضوء . ولايزال الكون - حتى الآن - يبدو متمددا بسرعة تقترب من سرعة الضوء .

من الشيق أن نحمن المصير النهائي لكوننا المتمدد . فعلى الرغم من أن التمدد يتباطأ نتيجة لقوى التجاذب ، إلا أننا لانعرف مايكفى عن الكون لنحكم عما إذا كان تمدده يتم بطاقات تسمح للمادة داخله أن تكتسب سرعة الهروب المناسبة . فلو أن له الطاقة الكافية لاستمر في التمدد إلى الأبد أما إذا لم يكن فإن التمدد لابد وأن يتوقف في النهاية . ثم تبدأ قوى الجاذبية في جمع شتات الكون مرة أخرى نحو شهاب أولى ملتهب كالذى بدأ به الكون ، أى أنه إذا صح هذا التصور لخلق الشهاب الأولى مرة أخرى ولأعيدت العملية مرة أخرى . وفي الحقيقة ، فإن الشهاب الذى وصفناه قد يكون هو الأخير ضمن سلسلة من النبضات فى كون نابض . وقد يبدو أننا لن نستطيع

أبداً أن نعرف شيئاً عن تاريخ الكون خلال النبضات السابقة حتى وإن وجدت بالفعل . هل يمكنك أن تقول لماذا ؟

٢٩ - ٢ المجرات والنجوم

عندما تمدد الكون في الفضاء ، انخفضت درجة حرارته بسرعة إلى الحد الذي أمكن معه تكون الجسيمات . وهناك تفاعل نموذجي يمكن أن يحدث في تلك الظروف وهو ما يسمى بالانتاج الزوجي (Pair Production) ، حيث يتحول الفوتون إلى إلكترون وبوزيترون . (وهذا هو عكس تفاعل فناء الجسيم المضاد) . هناك تفاعلات أخرى لها نفس الطابع العام حيث تتحول الطاقة - في الواقع - إلى كتلة سكون وتخلق شحنات متساوية ومتضادة . والنتيجة النهائية - عندما يبرد الشهاب - هي تكون غاز يحتوي أساساً على البروتونات والنيوترونات والالكترونات وجسيمات أخرى ذات طاقات عالية . وحتى هذه المرحلة كانت درجة الحرارة لا تزال عالية بحيث لا تسمح بتكون ذرات الهيدروجين وبالطبع لم يكن نوى الذرات الأثقل قد تكون بعد .

ويمكننا أن نحسب درجة حرارة الشهاب التي بدأ عندها تكون ذرات الهيدروجين نعلم أن طاقة تأين الهيدروجين هي 13.6 eV . ومن الواضح أن الطاقة الحرارية kT لا يمكن أن تكون أكبر من هذه القيمة إذا أريد للذرات الهيدروجين أن تتواجد . ولما كانت 300° K تناظر $\frac{1}{40} \text{ eV}$ ، فإن 13.6 eV لابد وأن تناظر درجة حرارة تقترب من $160,000 \text{ K}$. وعندما هبطت درجة حرارة الشهاب تحت هذه الدرجة فإنه أصبح يتكون من سحابة من غاز الهيدروجين الساخن مختلطاً بالنيوترونات والجسيمات الأساسية الأخرى وكما سنرى فيما يلي فإن سحابة الغاز التي تملأ الكون قد أصبحت باردة إلى الحد الذي أصبحت فيه درجة حرارتها الآن تقترب من 3 K .

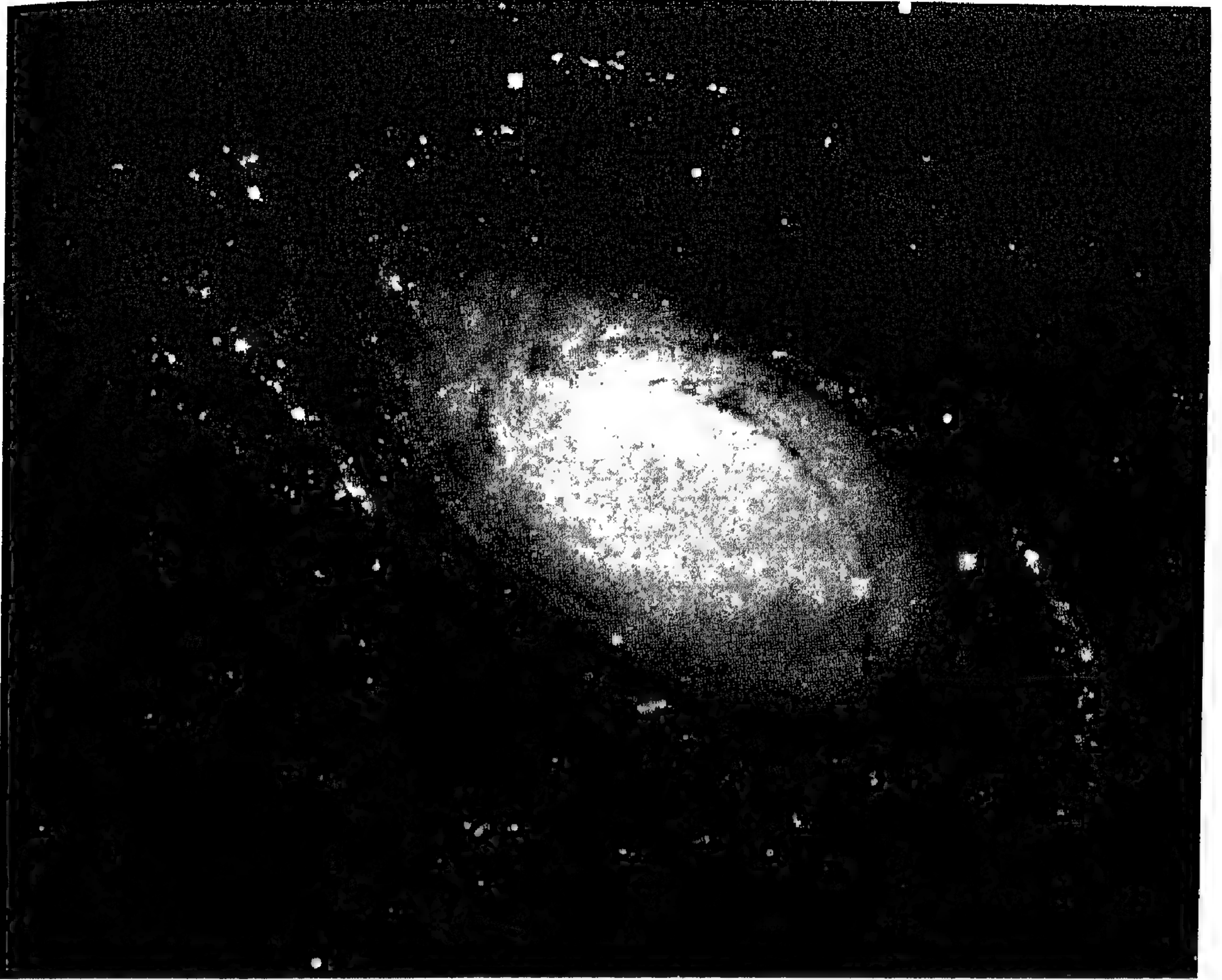
لقد ناقشنا - حتى الآن - السحابة المتمددة على أنها كيان متجانس أملس . ولم يكن الغاز - على الأرجح - موزعاً بانتظام في الفضاء ، إذ أن بعض المناطق كانت بها كثافات أعلى من الأخرى نتيجة لعوامل عشوائية ، مثل الحركة الحرارية . وعلى الرغم من عدم توفر البرهان المباشر للفرض التالي ، إلا أنه يبدو منطقياً أن المنطقة ذات الكثافة العالية - بشكل غير عادي - كانت بمثابة نقط بؤرية لما يمكن وصفه بأنه تكشف تجاذبي Gravitational Condensation وقد تكونت على امتداد أجزاء ضخمة من الفضاء قوى تجاذبية غير متوازنة جعلت المادة تبدأ في الاندفاع نحو المناطق ذات الكثافة العالية . وقد تراكب مع هذا التأثير بالطبع - الحركة الشعاعية الدائبة للمادة وهي تخرج من سحابة الشهاب الأصلية . وهذه المناطق الهائلة غير المحكمة والتي بدأت المادة تتدافع نحوها وتتجمع أصبحت هي الآن المجرات الهائلة وهي نظم مكونة من تجمعات مختلفة تحتوى على الكثير من النجوم .

تكون المجرات

وعندما بدأت السحابة في تكوين مناطق ذات كثافة عالية ، فإن الكتل المتكونة خضعت لقوانين الحركة العادية . وقد كان لأحد هذه القوانين ، وهو قانون بقاء كمية التحرك الزاوى ، أثره الملحوظ على سلوك السحابة المتكثفة . فللحصول على كمية التحرك الزاوى الأصلية $I_0\omega_0$ يجب ضرب أى كمية ضئيلة من الحركة الزاوية الصافية ω_0 - - لكتلة داخل المنطقة الضخمة التى كانت تحتلها المجرة - فى عزم قصور تلك المنطقة I_0 . على أنه عند حدوث التجمعات التى أدت إلى المجرة فإن نصف قطر الحركة التدويمية radius of gyration لكتلة المجرة أصبح أصغر بكثير وبهذا انخفضت قيمة I لأن $I \propto r^2$. وحيث أن كمية التحرك الزاوى يجب أن تكون محفوظة ، لذا $I\omega = I_0\omega_0$ وعليه فعندما تنقص I لزم أن تزداد ω . وبناء عليه فعند حدوث التكثف ، تبدأ المادة فى التدويم (Spin) حول مركز التكثف .

يكون تدويم كتلة السحابة المتكثفة أسرع مايمكن لتلك المناطق التى يكون دورانها عند البداية أكبر ولذا فلنا أن نتوقع أن يكون تدويم بعض المجرات ضئيلا جدا بينما يكون للأخرى سرعات زاوية كبيرة نسبيا (إن لفظ كبيرة فى هذا المقام يعنى ملايين من السنين فى كل دورة) ، وكشأن أى نظام به تدويم (مثل حبل مربوط به حجر أو كالبيتزا الدوارة Twirling Pizza) فإن عملية التدويم تجعل النظام يأخذ شكلا مفرطحا يشبه القرص بحيث يكون محور الدوران عموديا على مستواه . ويكون هذا التأثير أوضح مايمكن فى المجرات الحلزونية التى يكون التدويم فيها أسرع مايمكن (شكل ٢٩ - ١) . ويعتبر نظامنا الشمسى جزءا من مجرة أقل حلزونية ، وهو درب التبانة (Milky way) ، ويقع النظام الشمسى عند ثلثى المسافة تقريبا بعيدا عن مركز المجرة . (هناك مايقرب من 100 بليون نجم فى مجرتنا التى يبلغ قطرها حوالى 100,000 سنة ضوئية . ويلزم شمسنا حوالى 200 ميلون سنة لكى تدور حول مركز المجرة بسرعتها المدارية البالغة 150 mi/s تقريبا) .

وبينا تكون المجرة بأكملها لاتزال فى طور التكوين ، فإن مناطق محددة فيها تأخذ فى التكثف بسرعة كبيرة مكونة مراكز للكتلة تصبح فى النهاية نجوما فى المجرة . ومن السهل إدراك كيف يمكن أن تصبح ساخنة بدرجة عالية . عندما تجذب المادة نحو المركز بقوى الجذب فإن ط . و تتحول إلى ط . ح ويعنى هذا أن قدرا هائلا من الطاقة يحمل إلى مركز التكثف بواسطة الكتلة المتجمعة . ومن ثم تصبح درجة حرارة التجمع عالية إلى أقصى حد وتزيد فى الواقع على درجات الحرارة اللازمة للتأين الكامل لجميع ذرات الايدروجين فى التجمع . وتصبح هذه الكتلة الهائلة ، التى قد تكون أكبر عدة مرات من شمسنا ، ساخنة إلى درجة الالبيضاض ، كما أنها تشبه « حساء » كثيفا جدا يسمى « بلازما » وتتكون البلازما من بروتونات ونيوترونات والكثرونات وجسيمات أساسية أخرى . وهكذا يكون مولد نجم .



شكل ٢٩ - ١

المجرة الحلزونية M 81

(صورة فوتوغرافية من مرصد

« ليك » Lick) .

٢٩ - ٢ التطور النجمي

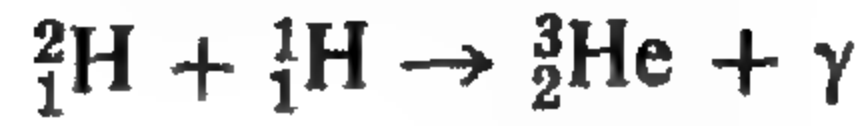
يأخذ النجم في التقلص كلما زاد الجذب الشعاعي نحو الداخل نتيجة لقوى الجذب حتى يتوازن ضغطه الداخلي مع الضغط الجذبي . وكما يحدث في أى غاز فإن الضغط الداخلي يزداد بازدياد درجة الحرارة - وتكون قوى الجذب في حالة التجمعات الصغيرة للمادة ضئيلة ولذا يتم الوصول إلى حالة من الاتزان عند درجات حرارة منخفضة نوعاً ما . أما بالنسبة للنجوم الكبيرة فإن التقلص يستمر حتى تصل درجة حرارة النجم عدة ملايين من الدرجات وعند هذه الدرجة المرتفعة يصل متوسط الطاقة الحرارية للبروتون حوالى 1000 eV وعلى الرغم من الصغر النسبى لهذه الطاقة فإن بروتونات ذات طاقة عالية كافية تتواجد بحيث يصبح التفاعل الاندماجى ممكناً .

وعند المراحل المبكرة يكون التفاعل الاندماجي الهام هو

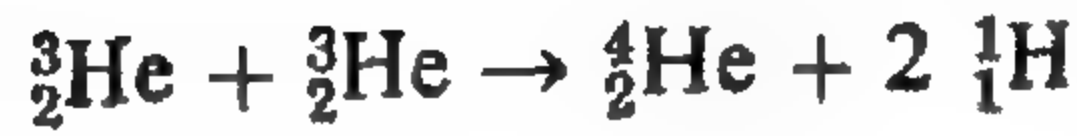


تفاعلات الاندماج
في النجوم

حيث يعرف النيوتريو بأنه جسيم صفرى الشحنة ولا كتلة سكون له . ثم يتفاعل
الديوترون ، ^2_1H مرة أخرى مع البروتون :



أما نظير الهليوم ^3_2He فيتفاعل كمايلي :



وبصيغة أخرى يمكن القول بأن البروتونات تندمج معا في هذا التفاعل مكونة هليوم ،
فتتفاعل ستة بروتونات مكونة نواة هليوم وبروتونين . وكأى تفاعل اندماجي من هذا
النوع تنطلق كميات هائلة من الطاقة . ويصبح النجم الآن قادرا على مد نفسه
بالطاقة دون اللجوء إلى مزيد من التقلص الجذبي .

وبمجرد أن يصبح التفاعل الاندماجي من القوة بحيث يكفل زيادة
الضغط الحرارى داخل النجم إلى الحد الذى يتوازن فيه الضغط الجذبي فإن
النجم يستقر . وتكون درجة الحرارة عند مركز النجم - وهو أكثر المناطق
سخونة ، قريبة من 15 مليون (كلفن) درجة مطلقة . وعلى الرغم من أن
تفاعل البروتون على الشمس ظل مستمرا على مدى 4.5 بليون سنة إلا أن هناك -
على ما يبدو - مايكفى من البروتونات لكى يستمر التفاعل بنفس المعدل لفترة
مساوية في المستقبل . أما في النجوم الأكبر من شمسنا فإن درجة حرارة باطنها تكون
أكبر . (لماذا ؟) وعند تلك الدرجات الهائلة للحرارة ، تصبح تفاعلات اندماجية
أخرى ممكنة الحدوث .

النجوم العملاقة
الحمراء

ولابد في النهاية أن تستهلك تفاعلات البروتون معظم البروتونات المتاحة وبهذا يأخذ
التفاعل في الابطاء . ويتضاءل نتيجة لهذا الضغط الحرارى فيقوم الجزء غير المتوازن من
الضغط الجذبي بجعل النجم يبدأ مرة أخرى في التقلص . وحين يحدث هذا تبدأ
الأجزاء الخارجية للنجم (التى كانت أبرد أولا) في التسخين إلى درجة تبدأ معها
البروتونات الموجودة هنالك في الدخول في تفاعلات اندماجية كالتي وصفناها من
قبل . والضغط الحرارى الناتج في هذا الجزء من النجم يجعل الطبقات الخارجية

تتمدد ، ومن ثم تكبر الأجزاء الخارجية للنجم أثناء التبريد وعند هذه المرحلة يتغير مظهر النجم من نجم ساخن إلى درجة الالبيضاخ إلى نجم أكبر بدرجة واضحة وأكثر احمرارا ولذا يسمى عملاقا أحمر .

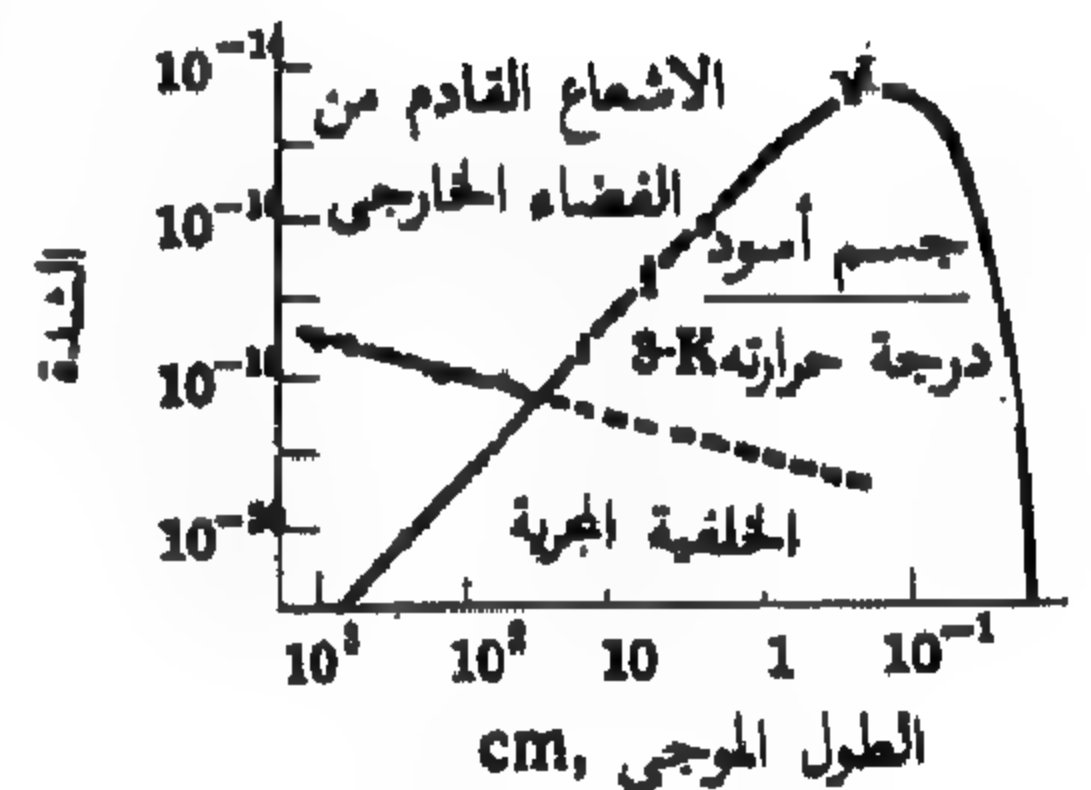
وعلى الرغم من أن السطح الخارجى للنجم قد برد خلال هذا التحول ، إلا أن باطنه قد سخن نتيجة للتقلص الداخلى . ويكون قلبه مكونا أساسا من ${}^4\text{He}$ الذى ينتج من التفاعل الاندماجى للبروتونات . ولا يبدأ الهليوم فى الاندماج إلا حين تصل درجة حرارة النجم إلى مايقرب من 100 مليون كلفن ، حيث يبدأ التفاعل التالى :



تفاعل ألفا
الثلاثية
ثم يتحد البريليوم مع الهليوم :



ويسمى هذا التفاعل بتفاعل ألفا الثلاثية وذلك لأن ذرة الهليوم المنتزعة هي جسيم α وليست المراحل المتقدمة للتطور مؤكدة ولكن التجارب المعملية التى تستخدم فيها معجلات ضخمة قد بينت أن التفاعل بين ${}^{12}\text{C}$ والجسيمات الأخرى ذات الطاقة العالية فى النجم يمكن أن تؤدي إلى تكوين نوى أضخم .



درجة حرارة الفضاء

يمكننا اعتبار الكون بأجمعه على أنه يشبه باطن فرن هائل ، وتكون درجة حرارة الفرن هي متوسط درجة حرارة الكون . وكما رأينا فى الفصل السادس والعشرين فإن الاشعاع الصادر عن جسم أسود يعتمد فيه الطول الموجي بطريقة مميزة على درجة حرارة الجسم الأسود . وبمعرفة توزيع الأطوال الموجية للاشعاع الكهرمغناطيسى الذى يصلنا من الفضاء الخارجى ، يمكننا تحديد درجة حرارة الفرن المحيط بنا ، ألا وهو الكون . وتشير البيانات التجريبية المتاحة حاليا إلى أن متوسط درجة حرارة الكون يقترب من 3 K وهذا ما يوضحه الشكل المبين حيث تمثل النقاط البيانات بينما يمثل الخط ما يمكن التنبؤ به لجسم أسود 3-K طبقا لقانون بلانك للاشعاع . ويكون موقع القيمة العظمى على منحنى الشدة عند طول موجى قرب 1 cm ، وهو فى مدى الأمواج الدقيقة (microwaves) أو أمواج الرادار القصيرة . وتُسم القياسات فى هذا المدى بالصعوبة البالغة لسببين : (١) أن الأجهزة المطلوبة تقع بالقرب من حدود الأجهزة المتاحة للكشف الالكترونى ، (٢) أن جو الأرض يمتص الاشعاع فى هذا المدى من الأطوال الموجية بشكل عظيم مما يجعل من المستحيل الحصول على نتائج يعتمد عليها فوق سطح الأرض أما إذا أقيم مرصد فوق سطح القمر أو فى الفضاء فإن هذه الصعوبة يمكن التغلب عليها . على أننا نجد أن البيانات المتاحة حاليا تقترح بشدة أن متوسط درجة حرارة الكون تقترب من 3 K .

وفي الواقع يبدو محتملا أن العناصر المستقرة في الجدول الدوري قد تكونت عند هذه المرحلة من حياة النجم . وحيث أن شمسنا والكواكب تحتوي جميعها على كميات - يمكن مقارنتها ببعضها البعض - من العناصر الثقيلة ، فإن الحل لمرحلة التطور التي مر بها نظامنا الشمسي يكمن هنا .

النجوم القزمة البيضاء

ولابد في نهاية الأمر أن تخمد التفاعلات الاندماجية في باطن العملاق الأحمر - عندما تنفذ كمية الوقود المتاحة ، وعندئذ لاتصبح قوى الجذب متوازنة بما يكفي من الضغط الحرارى ويأخذ النجم في التقلص ، كما أن حرارته ترتفع أكثر فأكثر نظرا لتحويل طاقة الوضع إلى طاقة حرارية . وبعد عدة عشرات من ملايين السنين يكون النجم قد تقلص إلى جسم كثيف جدا وساخن إلى درجة الابيضاض ويطلق عليه قزم أبيض .

ولدينا أسباب نظرية جيدة للاعتقاد بأن القزم الأبيض لايمكن أن يكون مستقرا إذا زادت كتلته عن 1.2 مرة قدر كتلة الشمس . وعلى الرغم من نقص البرهان الحاسم لهذا الفرض - لأننا لانعرف سوى كتل عدد قليل من الأقزام البيضاء تم تحديدها عمليا - إلا أن البيانات المتاحة لاتتناقض معه . ومع هذا فحيث أن كثيرا من العمالقة الحمراء لها كتل أكبر بكثير من الكتل المذكورة فإنها يجب أن تفقد من كتلتها بشكل ما عندما تتقلص لتصير أقزاما بيضاء ، ولايعرف حتى الآن كيف يتم هذا الأمر بدقة .

واحذى الامكانيات التي تتفق مع ماهو مشاهد هي أنه خلال عمليات رصدت على أنها نجم مستعر (nova) أو نجم متفجر فائق التوهج (supernova) كان العملاق الأحمر المتقلص يمر بانفجارات متعددة عند اقترابه من مرحلة القزم الأبيض . وتقوم هذه الانفجارات بارسال كتل ضخمة من الغازات المكونة من نوى نحو الفضاء . ونتيجة لهذا تكتسب المجرة سحابة مكونة أساسا من ايدروجين وهليوم كما أنها تحتوي على نوى عناصر أثقل . ويمكن بعد ذلك لهذه السحابة أن تمر بعملية تكثف جذبي وبهذا تتكون نجوم جديدة . وبناء على هذا يمكن لكل العملية التي وصفناها فيما سبق لتطور النجوم أن تتكرر . ولو كان لنا أن نعتقد في هذا الفرض لبدت شمسنا كنجم من هذا النوع إذا أنها تحتوي على نوى عناصر ثقيلة ، وفي نهاية الأمر (ربما خلال ٤ أو ٥ بلايين من السنين) ستصبح شمسنا عملاقا أحمر ؛ وبعد ذلك عليها أن تتقلص حتى تصبح قزما أبيض . ومن الطبيعى أنه خلال مرحلة العملاق الأحمر ستكون الأرض قد أصبحت بمن السخونة بحيث لاتصلح لسكنى البشر .

٢٩ - ٤ الكون المتمدد

تعتبر نظرية الانفجار العظيم أن الكون يتمدد . فإذا كان الأمر كذلك فإن علينا أن نلاحظ تأثير دوبلر في ضوء النجوم المتراجعة . لنحسب العلاقة بين الطول الموجي لخط في طيف الايدروجين مثلا ، صادر من مصدر على الأرض وليكن λ_0 إذا ما قورن بالطول الموجي المرصود لمصدر فوق نجم . وافترض أن النجم يتراجع بعيدا عن الأرض بسرعة v

أعتبر الآن قمة الموجة التي يبعثها مصدر النجم . ستتقل هذه القمة نحو الأرض مسافة قدرها ct في زمن مقداره t ، حيث c هي سرعة الضوء على أن المصدر النجمي سيقوم بابتعاث قمة الموجة مرة كل τ_0 ثانية طبقا لجهاز توقيت موجود على النجم . و طبقا للنظرية النسبية فإن هذا الزمن τ_0 سيكون في الواقع $\tau_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ إذا ما قيس بواسطة ساعة أرضية . ونتيجة لهذا فإن المسافة التي ستقطعها القمة الأولى خلال الفترة بين ابتعاثها وابتعاث القمة التالية لها هي (طبقا لمشاهد أرضي) .

$$ct = \frac{c\tau_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \text{المسافة}$$

وخلال هذه الفترة سيكون المصدر النجمي قد انتقل مسافة قدرها vt أى أن القمة الثانية ستبعد في الواقع خلف القمة الأولى مسافة قدرها $vt + ct$. وتكون هذه المسافة في الواقع ، هي الطول الموجي الذي سيرصد من على الأرض ، أو

$$\lambda = \frac{(c + v)\tau_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad : \quad \text{أو} \quad \lambda = ct + vt$$

ولكن حيث أن المصدر النجمي نفسه يعتبر نظاما قصوريا (inertial system) لذا وجب أن تنطبق هنا أيضا القوانين العادية . ومن ثم $\tau_0 = \lambda_0 / c$ وعلى ذلك فإن الطول الموجي لخط الطيف النجمي كما يرصد من على الأرض يرتبط بالطول الموجي للخط الصادر من مصدر ساكن ، بالعلاقة التالية :

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

* لو قارنت هذه العلاقة بمعادله تأثير دوبلر في حالة الصوت والتي جصلنا عليها في الفصل الخامس عشر لوجدت أنهما مختلفتان ومع هذا فعند قيم منخفضة للمقدار v/c حين تكون التأثيرات الناتجة عن النسبية مهمة فإن المعادلتين تنفقان .

من هنا نجد أن λ أكبر من λ_0 . وبعبارة أخرى ستبدو الأطوال الموجية لخطوط الطيف الصادرة من نجم يتراجع وكأنها قد استطالت ، أى زحزحت من الأزرق نحو الأحمر . وهذا ما يشار إليه عادة بالزحزحة الحمراء .

الزحزحة الحمراء

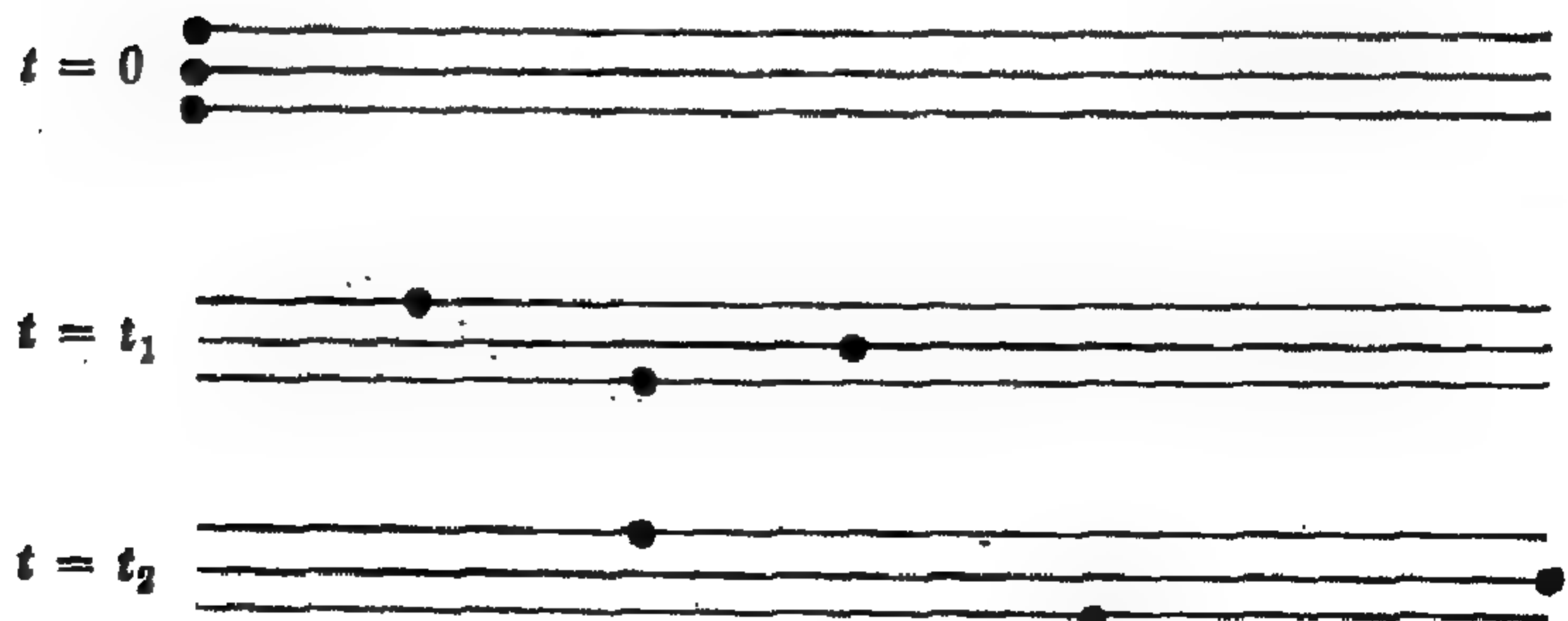
ولو أننا فحصنا الضوء الذى يصلنا من النجوم لوجدنا بالفعل أن الأطوال الموجية التى تتبعها الذرات قد زحزحت نحو الأحمر ، ويفسر هذا على أنه يعنى تراجع جميع النجوم بعيدا عنا . باستخدام معادلة الزحزحة الحمراء ، من الممكن حساب سرعات التراجع للنجوم . وقد وجد أنه كلما بعد النجم عن الأرض كلما زادت سرعة تراجعه بعيدا عنها . ولذا فللنجوم البعيدة جدا تصبح v قريبة جدا من c ، سرعة الضوء . ولتلك النجوم تزعج الخطوط الزرقاء نحو مادون الحمراء .

وقد وجدت علاقة تجريبية بسيطة بين سرعة التراجع v لنجم ما وبعده عن الأرض s وهذه هي :

$$s = 3.6 \times 10^{17} v \quad m$$

ولنحاول الآن تفسير هذه العلاقة فى إطار نظرية الانفجار العظيم وسنجد أنها تتيح لنا حساب عمر الكون .

تعتبر الأرض طبقا لنظرية الانفجار العظيم جزءا من السحابة المتمددة التى أصبحت الآن باردة تماما . ومن خصائص النظام المتمدد أن كل شئ بداخله ينفصل عما عداه كما هو مبين فى الشكل ٢٩ - ٢ . فلو أن جسمين يتحركان على طول نفس الخط ولكن بسرعتين مختلفتين v_1 ، v_2 ، لانفصلا بسرعة تبلغ $v_2 - v_1$. ولو افترضنا أنهما بدءا من نفس النقطة عندما كان الزمن $t = 0$ ، أى عند الانفجار الأول للشهاب ، لأصبحت المسافة التى تفصلهما هى :



شكل (٢٩ - ٢)

إذا بدأت النقط من نفس الموقع وفى نفس اللحظة فإنها تتراجع عن بعضها البعض نظرا لتباين سرعاتها .

$$s = (v_2 - v_1)t$$

ولكن هذه العلاقة شبيهة وتنطبق في الشكل مع العلاقة التجريبية التي وجدت من بيانات الرزحة الحمراء وهي ،

$$s = (v)(3.6 \times 10^{17})$$

ومن تعريفنا للكمية $v_2 - v_1$ نجد أنها هي نفسها v ومن ثم يكون لدينا ،

$$t = 3.6 \times 10^7 \text{ s} = 1.1 \times 10^{10} \text{ yr}$$

على أنه هو الزمن الذي انقضى منذ الانفجار الأول للشهاب وحتى الآن . وهذا مايعطينا عمرا قدره ١١ بليوناً من السنين للكون . وعلى الرغم من أن هذا العمر قد أمكن الوصول اليه من افتراضات أخرى تجريبية ، إلا أن هناك من البيانات الأخرى مايعمل على تدعيمه ولو بطريقة تقريبية . وأحد الأدلة المدعمة يرد في القسم التالي .

عمر الكون

٢٩ - ٥ تحديد العمر من النشاط الإشعاعي

يعتبر أمراً بسيطاً من حيث المبدأ أن تحدد عمر صخرة أو مادة ما إذا كانت تحتوى على مادة مشعة إلى جانب نواتج انحلالها . فهناك ، على سبيل المثال ، عند أماكن عديدة على ظهر الأرض صخور لازالت تحتوى على كميات محسوسة من ^{238}U . وعمر النصف لهذا العنصر هو 4.5 بليون سنة وينحل حتى يصل إلى الناتج النهائي وهو ^{206}Pb وهو أحد النظائر الأقل وفرة للرصاص وهو يوجد مختلطاً مع ^{238}U .

وينحدث أننا نجد على ظهر الأرض كمية من ^{238}U في الصخور بقدر ما نجد ^{206}Pb ولذا كان علينا أن نستنتج أن نصف اليورانيوم قد انحل إلى رصاص في الفترة التي انقضت منذ تكون الصخور . وعند ملاحظة أن نصف اليورانيوم هو الذى انحل ، فإننا نخلص إلى أن الصخر يبلغ من العمر ما مقداره عمر نصف واحد لليورانيوم ^{238}U أو 4.5 بليون سنة* . وهذا يعطينا الزمن الذى انقضى منذ بردت الأرض بدرجة كافية تسمح للصخور أن تتجمد عند سطح الأرض . ويمكن معرفة عمر الأرض نفسها إذا ما عرفنا كيفية تكون الأرض وهذا مالا نعرفه على وجه اليقين . وتتفق جميع العناصر الطبيعية المشعة الأخرى والتي تستخدم في تحديد عمر صخور الأرض - إلى حد منطقي مع النتيجة التي أوجدناها سالفاً .

عمر الأرض

* وبدقة أكثر ، حوالي 3.9×10^9 سنة

التأريخ بالكربون المشع

ويمكن أيضا استخدام طرق التأريخ الاشعاعى لتأريخ المواد الأصغر سنا . فالمواد التى تحوى كربونا يمكن وضعها داخل تدريج زمنى بشرط أن تكون المادة قد أتت أصلا من مصدر للحياة الحيوانية أو النباتية وتسمى هذه الطريقة التأريخ بالكربون المشع وهى تبنى على أساس استعمال النظير النادر ^{14}C .

تقوم الأشعة الكونية التى تضرب الاجزاء العليا من جو الأرض بتكوين ^{14}C من خلال التفاعل التالى :



ويبلغ عمر النصف لهذا النظير غير المستقر 5730 yr ، ويقوم بعد تكوينه بالدخول فى دورة الجو وهو على هيئة CO_2 أحيانا . تقوم النباتات بامتصاص CO_2 ودججه فى أوراقها وانسجتها الأخرى وبهذا تحتوى الحياة النباتية على بعض ^{14}C بداخلها . وقبل بداية اختبارات القنابل الذرية كانت نسبة ^{14}C إلى ^{12}C فى النبات تصل إلى 1.5×10^{-12} ومن ثم فكل الحياة النباتية تعتبر الآن مشعة بقدر ضئيل .

لو أن لدينا قطعة قديمة من الخشب ووجدنا بطرق دقيقة أن ما بها من نشاط اشعاعى نتيجة لوجود ^{14}C يبلغ نصف ما بالأخشاب الحية حاليا ، لافترضنا أن قطعة الخشب قد ظلت ميتة لزمان كاف لانحلال نصف كمية ^{14}C وحيث أن هذه الفترة هى عمر النصف 5730 yr للنظير ^{14}C فإننا نستنتج أن هذا هو عمر قطعة الخشب . ولقد استعملنا بالطبع أرقاما بسيطة فى هذه الحسابات بالرغم من أن الطريقة ليست محدودة بهذه الأرقام . ولا يمكن تأريخ منتج صناعى قديم جدا بهذه الطريقة نظرا لأن نشاطه الاشعاعى قد انخفض إلى مستوى ضئيل جدا . وعلى الجانب الآخر للتدريج الزمنى فإن الجسم يجب أن يكون من القدم بحيث يكون نشاطه الاشعاعى قد انخفض - على الأقل - بما يسمح بالقياس .

كانت هذه لمحة خاطقة عن طرق التأريخ المبنية على النشاط الاشعاعى وهناك كثير من النظم الأخرى التى يمكن استخدامها للتحقق من صحة الآخر . ويقدر ماتعينا الأرض والقمر يمكننا القول بشئ من اليقين أن أعمار أقدم الصخور على كليهما تكاد تكون متساوية وتبلغ 3.9 بليون سنة .

٢٩ - أصل الأرض

على الرغم من أن عمر أقدم الصخور على الأرض قد تم الاتفاق عليه بشكل جيد على أنه حوالى 3.9 بليون سنة الا أن الظروف التى أدت إلى خلق المجموعة الشمسية والأرض تعتبر مجالا خصبا للحدس . فكما رأينا هناك سبب للاعتقاد بأن شمسنا

تعتبر حصيلة للمرحلة الثانية للتكثف ، ويبدو أنها قد تكثفت من بقايا الانفجار الذى صاحب تكون واحد أو أكثر من الأقزام البيضاء . ولو قبلنا بهذا الفرض لأمكن اقتراح عدد كبير من النظريات التى تبحث فى تكوين الكواكب . على أن أكثر هذه النظريات احتمالا هى التالية :

عندما بدأت السحابة فى التقلص لكى تكون الشمس ، فإن مبدأ بقاء كمية التحرك الزاوى استلزم أن تدور السحابة بسرعة أكبر فأكبر . ولكى تظل كمية التحرك للمجموعة الشمسية ثابتة كما هو الآن - فى حالة عدم تكون الكواكب - فإن السرعة الزاوية للشمس كان يجب أن تصبح أكبر بكثير عما هى الآن . ومن الواضح أنه خلال عملية التقلص ، ثبت من وجهتى نظر الطاقة والحركة أنه من الاجدى للسحابة الدائرية أن تنفصل إلى أجزاء محددة بينما يتقلص الجزء المركزى فقط مكونا الشمس . وقد مرت الاجزاء الخارجية بعمليات تكثف محلية مكونة الكواكب . وتنبأ هذه الصورة بأن كل الكواكب يجب أن تدور بنفس الطريقة حول الشمس حتى تحتفظ بهذا كمية التحرك الأصلية للسحابة والأمر فى الحقيقة كذلك .

وإذا ما استطرنا فى التحليل كما سبق عند مناقشة تكون النجوم ، فإن طاقات حرارية هائلة تتولد نتيجة لتقلص السحابة عند تكوين الشمس والكواكب . وكلما زادت كتلة الجرم كلما زادت قوى الجذب ومن ثم ارتفعت درجة حرارة الجرم المتكون . وفى حالة الشمس ، ارتفعت درجة الحرارة إلى الحد الذى يبدأ عنده التفاعل الاندماجى . أما بالنسبة للكواكب فقد كانت أقل وزنا بكثير ولذا كانت درجات حرارتها أقل بكثير من تلك التى للشمس ، بحيث كانت أقل بكثير من أن تشعل تفاعلا اندماجيا . ولسنا على يقين عما إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للأرض بدرجة كافية حتى تجعلها على هيئة منصهرة .

الأرض المنصهرة

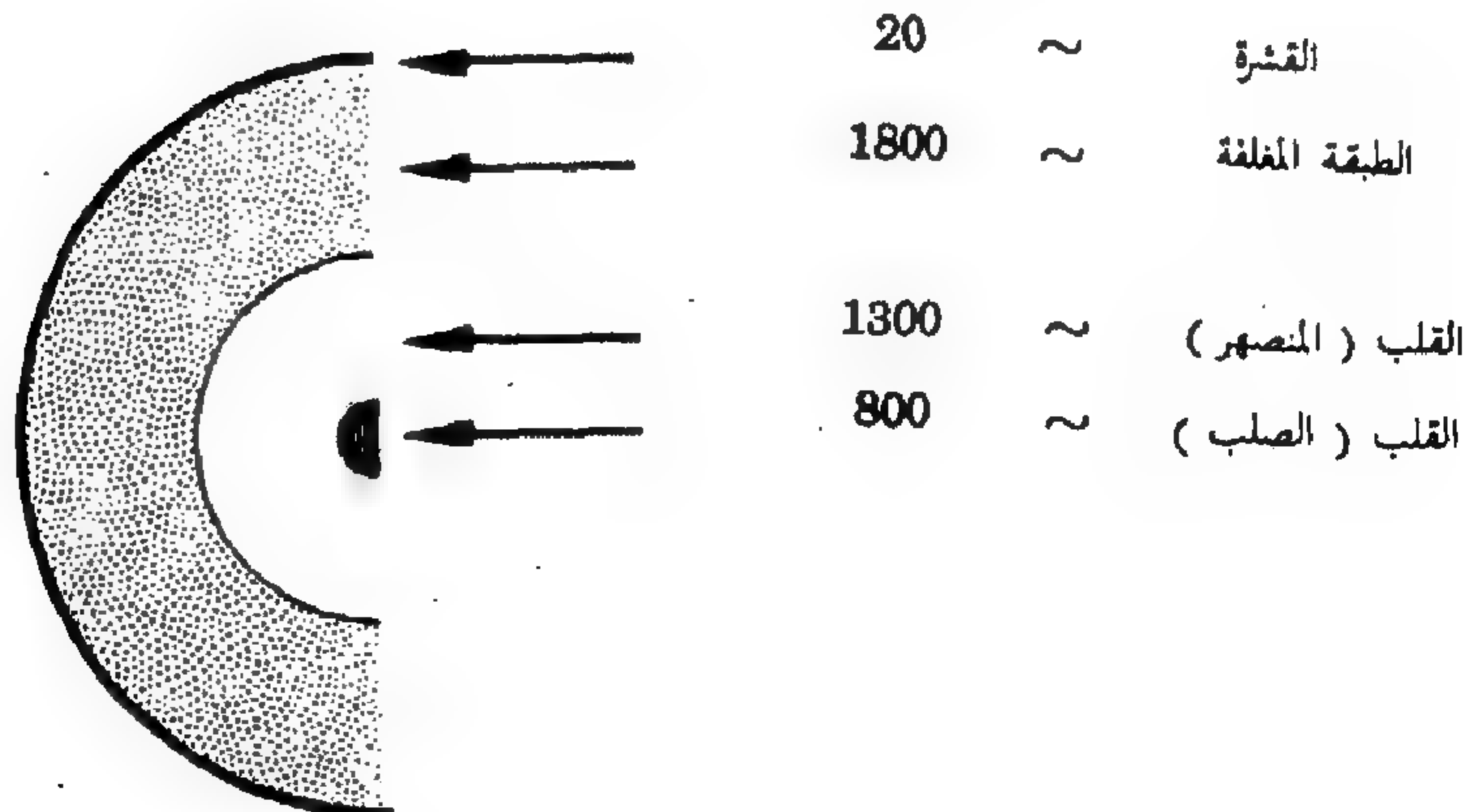
هناك كثير من الأدلة على أن الأرض كانت منصهرة فى احدى مراحل تطورها ولكن هذه المرحلة كانت من الأسهل أن تحدث فيما بعد . وفى الحقيقة لا يزال جزء كبير من قلب الأرض منصهرا حتى الآن . ويعتقد أن درجات الحرارة المرتفعة جدا والمتولدة هناك هى نتيجة للطاقة المنطلقة خلال الانحلال الاشعاعى للكميات الضئيلة للنوى غير المستقر والتى لا تزال موجودة على الأرض . وعندما تكونت الأرض فإن النشاط الاشعاعى كان أكبر بكثير عما هو الآن ويعتقد أن الأرض ظلت فى الحالة المنصهرة لفترة من الزمن نتيجة للطاقة المنطلقة خلال الانحلال الاشعاعى .

وقد كانت الأرض تتكون في تلك المرحلة المبكرة من جميع العناصر ، ألا أن العناصر الخفيفة كانت هي الغالبة نظر لأنها تكونت بكميات وفيرة في الشهاب ، وحيث أن ذرات كثير من العناصر الخفيفة كانت سرعتها أكبر من سرعة الهروب عند درجة الحرارة المرتفعة تلك فإن كثيرا من الهليوم غير المتفاعل (nonreactive) تبخر بعيدا كما أن جزءا صغيرا فقط من الأيدروجين الأصلي هو الذي فشل في الهروب . وقد فقد من الأرض في تلك المرحلة كثير من العناصر الأخرى ذات نقط الغليان المنخفضة والتي لم تتمكن من التفاعل بسهولة مع بعضها لتكون مركبات ذات نقط غليان مرتفعة . أما الجزء الرئيسي من الأرض والذي تخلف فكان مكونا من الحديد والسليكون ، الأكسجين ، المغنسيوم ، والألمنيوم . وقد يبدو من الغريب أن الأكسجين وهو غاز خفيف نسبيا قد تخلف بكميات كبيرة على الأرض . والسبب في ذلك أن الأكسجين يتحد مع السليكون مكونا أيونات وجزيئات السليكات الثقيلة نسبيا والتي ظلت على الأرض .

بمرور الزمن ، أخذت الأرض تبرد بإشعاع الحرارة نحو الفضاء ثم تماسكت قشرة الأرض ، وخلال عملية التبريد صعدت المواد إلى السطح . وقد كانت هذه العملية فعالة في تصنيف المواد داخل الأرض . ففي حين هبط الحديد والسليكون المنصهرين نحو المركز فإن السليكات والمركبات المشابهة الخفيفة تحركت نحو السطح .

لقد أصبح الموقف اليوم معروفا لدينا ولو بطريقة سطحية بالنسبة لباطن الأرض وذلك من عدة مصادر . فقد بينت الموجات التي تنعكس وتخترق الأرض بعد صدورها من مواقع الزلازل أو من الانفجارات التي يجريها الإنسان ، أن سطح الأرض له قشرة رقيقة يبلغ سمكها حوالي 20 ميلا كما يوضح الشكل ٢٩ - ٣ . ويقع تحت هذه القشرة منطقة سميكة تسمى الطبقة المغلفة (mantle) وأسفل هذه الطبقة يقع القلب المنصهر الذي قد يحتوي على قلب داخلي صلب وهو صغير نسبيا . ولتحدث عن كل في دوره .

السك ، ميل



شكل (٢٩ - ٣)
صورة تقريبية لتركيب الأرض

يكون تركيب القشرة متباينا ولكنه يتميز بالحقيقة القائلة بأن 45 في المائة منه على هيئة أكسجين متحد مع عناصر أخرى ، فمعظم الصخور على الأرض هي أساسا مركبات الأكسجين والسليكون كما في السليكات وذلك بالرغم من وجود مركبات الأكسجين مع الألمونيوم والحديد والكالسيوم ، الخ .

وتمتد الطبقة المغلفة montle مايقرب من 2000 mi في داخل الأرض تحت القشرة والطبقة المغلفة أيضا صلبة . ولازالت هذه الطبقة دافئة تستدفيء - تماما مثل القشرة - بفعل الحرارة التي تنتجها المواد المشعة في الأرض . (أن سطح الأرض فقط هو الذي يصيبه تسخين شديد بفعل الشمس) ويعتقد أن الطبقة المغلفة تتكون أساسا من أكسجين ومغنسيوم وسليكون على هيئة المركب سليكات المغنسيوم .

وعلى الرغم من أن درجة الحرارة في الطبقة المغلفة السفلى تصل بها إلى درجة الاحمرار الا أن المادة واقعة تحت ضغط هائل وهي في الحالة الصلبة .

يقع القلب المنصهر تحت الطبقة المغلفة ويمتد إلى مركز الأرض تقريبا وهو مكون أساسا من الحديد (هكذا نعتقد) على أنه قد يحتوي على كميات محسوسة من النيكل والسليكون أيضا . وتفترض نظرية معاصرة أن هناك تيارات كهربائية تسري خلال القلب المعدني المنصهر وأن هذه التيارات يظن أنها سبب المجال المغناطيسي للأرض . على أن كل هذه العمليات لاتعدو كونها تخمينية .

أن معرفتنا للأرض مازالت في حالة يرثى لها من عدم الاكتمال ويزيد على هذا أن القمر والكواكب الأخرى أقل حظا من معرفتنا . وحتى كتابة هذا الكتاب وبالرغم من الانزالات الحديثة الا أنه ليست لدينا نظرية مقبولة عن أصل القمر . أما تركيب وتاريخ الكواكب الأخرى فلازال يحوطه الغموض التام . وليس من المحتمل أن نعرف في المستقبل القريب الخصائص الكاملة للقمر وذلك نظرا لما نعانيه من نقص في فهمنا للأرض نفسها . ومن الواضح إذن انه لازال أمامنا الكثير نتعلمه عن مجموعتنا الشمسية .

٢٩ - ٧ نهاية البداية

تناولنا في الأقسام السابقة لمحات خاطفة عن المجالات الواسعة للفيزياء الفلكية والأرضية وهذه المجالات ضمن مجالات أخرى مثل الفيزياء الحيوية وفيزياء الجسيمات تعتبر جانبا ضئيلا من الموضوعات التي كنا نود أن نتمكن من مناقشتها بالتفصيل ، الا أن أي كتاب يجب أن تكون له خاتمة . وعلى الرغم من أن الفيزياء وأهميتها بالنسبة لك أكبر من أن تحتويها دفنا كتاب واحد الا أنك قد بدأت - على الأقل - في استيعاب أفاقها في هذا الكتاب .

وإذا ما نظرنا إلى المستقبل فلعلك تعلم أن فيزياء اليوم ليست الا بداية للفيزياء التى ستعرف بعد قرون من الزمان . ونتوقع أنه فى الأعوام القادمة سوف تندمج علوم الفيزياء البيولوجيا والطب والكيمياء وعلم النفس أكثر فأكثر لتصبح علما شاملا واحدا وكلما زادت معرفتنا بالجزئيات وكيفية اتحادها معا لتكوين الخلايا ، كلما أصبح لدينا الأساس القوى لمعرفة أسس الحياة نفسها .

على أن هذا ليس الا أحد الطرق التى ستسلکها فيزياء الغد . فمعرفةنا بالكون لازالت فى مهدها ولازلنا فى بداية فهمنا لكيفية خلق الكون . وليس سلوك المجرات البعيدة وماضى ومستقبل النجوم الا مشاكل قليلة تشد اهتمام علماء الفيزياء الفلكية المعاصرين . ولا يمكننا مجرد التخمين عن المنهج الذى ستسلکه ابحاثهم فى السنوات القادمة .

وبينا ينشغل البعض ببحث المراحل الشاسعة للكون فإن كثيرا من العلماء سيعكفون على اجابة الأسئلة التى تدور حول الكيانات الضئيلة جدا التى نعرفها ، فلازل فهمنا للنواة غير مكتمل . وقد بدأنا بالكاد نتعلم شيئا عن التركيب « الداخلى » للجسيمات « الابتدائية » . ويعتقد كثير من الناس أننا لن نصل أبدا إلى معرفة ما يدور داخل النيوترون ، (إذا كان هناك ما يدور على الإطلاق) على سبيل المثال . ويصعب علينا توقع أن يكون علماء عام ١٩٠٠ قد تنبأوا بالاكتشافات الهامة بالنسبة لفيزياء اليوم ألا وهى - الفوتون - النسبية ، والسلوك الموجى للمادة . ونحن بدرونا يمكننا التنبؤ - فقط - بأن أيام الاكتشافات المثيرة لم تنته بعد . ولعلك ستهم بشكل مباشر بتلك التطورات ، وذلك لأنك ستعيش فى عالم يتأثر بها تأثرا عظيما وسنأمل أن تستفيد من المعرفة التى جنيتهما من هذا الكتاب كأساس تبنى عليه فى المستقبل وأن تتمكن من الربط بين اكتشافات العلم واحتياجات المجتمع . فكثير من الناس يتحدث عن العلم كما لو كان وحشا سيفترس المجتمع فى نهاية الأمر وهذا طبعا أحد الاحتمالات التى يجب علينا جميعا مواجهتها علماء وغير علماء .

أنا كبشر لا نستطيع أن نخبئ رؤسنا فى الرمال ونأمل أن تتوقف الاكتشافات العلمية أو تتلاشى بسلام ، فالعلم سوف يستمر فى التقدم . أما إذا ما كان هذا التقدم سيؤدى إلى تحسن لظروف الحياة أم إلى تدمير البشرية . فهذا يرجع إلى الطريقة التى سنتفاعل بها كأعضاء فى المجتمع مع هذا التقدم . ولكى نجنى الفائدة الصحيحة من اكتشافاتنا العلمية يجب أن نتضافر جهود العالم والسياسى والفيلسوف وعالم الأديان بلى وكل المواطنين . ويجب أن يفهم كل منا الآخر إذا كان علينا أن نساعد بعضنا البعض فى هذه المهمة الجلية . وحتى أولئك الذين لن يستزيدوا من دراسة

الفيزياء سيصبحون الآن أفضل استعداد لمواجهة هذا التحدى . أننا نأمل أنه بالمعرفة والفهم اللذين حصلتم عليهما من هذا الكتاب أن تثبؤوا مكانكم الصحيح فى كون الغد .

ملخص

لقد وجد كوننا - طبقا لنظرية الانفجار العظيم - منذ مايقرب من ١١ مليون سنة على هيئة كرة ساخنة إلى أقصى حد وذات كثافة هائلة . ثم تمددت تلك الكرة بسرعة وبسردت . وهى لازالت تتمدد ولاندرى هل تظل مستمرة فى التمدد إلى الأبد أم أنها ستبدأ مرة أخرى فى التقلص حتى تعود إلى شكلها الأصيل .

وعندما تمدد الكون وبرد ، أدت التغيرات فى الكتلة إلى ظهور مناطق من المادة المتكثفة التى كونت المجرات ، ثم تكونت الشمس الساخنة (أو النجوم) داخل المجرات عندما ولدت المادة المنجذبة إلى داخل نقطة التكثف بقوى الجذب - حرارة نتيجة التصادم . وقد كانت درجة الحرارة المتولدة من الكبر بحيث مكنت من اشتعال التفاعل النووى الاندماجى الذى يقوم بامداد النجم بالطاقة الاضافية . وعندما يتقلص النجم ويمر بمراحل تطوره المختلفة فإن العناصر ذات الأعداد الذرية المرتفعة التى توجد فى الكون - تبدأ فى التكون وتطرد بعيدا عن النجم .

يمكن تحديد عمر الصخور القديمة على سطح الأرض من نشاطها الاشعاعى وتدل تلك القياسات على أن قشرة الأرض قد تماسكت منذ مايقرب من 3.9 بليون سنة . ففى أحد المراحل كانت الأرض منصهرة . وقد كان جزء من الحرارة اللازمة قد نشأ عن قوى الجذب التى كونتها أما الجزء الآخر فقد كان نتيجة للطاقة الناتجة عن الانحلال الاشعاعى . ولايزال مركز الأرض منصهرا حتى الآن ويستمد حرارته من المواد المشعة .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية :

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

- ١ - أن توضح معالم نظرية الانفجار العظيم متضمنا مايلى : الوضع الأصيل التمدد والتبريد ، تكون المجرة ، الدوران ، تكون النجم ، مصادر طاقة النجوم ، انتاج He والعناصر ذات Z المرتفعة ، ماحدث على امتداد الزمن منذ الانفجار العظيم .
- ٢ - أن تصف العملية التى تم بها تسخين مادة النجوم إلى الحد الذى أمكن معه اشعال تفاعل الاندماج . أن تذكر طريقة اساسية واحدة - على الأقل - تم بها محافظة النجوم والشمس على درجة حرارتها المرتفعة .
- ٣ - أن تفسر كيف أن الزحزحة الحمراء تشير إلى أن الكون يتمدد .
- ٤ - أن تشرح كيف يمكن تحديد عمر الصخور الحاملة لليورانيوم من تحليل مكوناتها أن تذكر الفكرة الأساسية للتأريخ بواسطة الكربون المشع للمواد العضوية .
- ٥ - أن ترسم تخطيطيا مقطعا مستعرضا للأرض وتشير إلى الطبقات الرئيسية لها . وأن تذكر تقديرا تقريبا لسمك القشرة . أن تذكر أى الاجزاء منصهر .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

نظرية الانفجار العظيم

عمر الكون

المجرة

الشمس والنجوم

العملاق الأحمر ، القزم الأبيض
درجة حرارة الكون في الوقت الحاضر
الزحزحة الحمراء
القشرة ، الطبقة المغلفة ، قلب الأرض .

أسئلة وتخمينات

- ١ - ماهي العوامل الواجب معرفتها حتى نحسب ما إذا كان كوننا سينبض أم سيتمادد إلى الأبد ؟
- ٢ - لم لا يمكن تحديد ما إذا كان الكون قد نبض عدة مرات من قبل ؟
- ٣ - تشير معلوماتنا إلى أن الشهاب الأول المتوهج قد استغرق حوالى ساعة لكي يبرد إلى مدى $k 10^{10}$. ماهو متوسط الطاقة الحرارية kT بوحدة الإلكترون فولت في ذلك الوقت ؟ قارن هذه الكمية بطاقة ترابط نواة ^4He . مالذى يمكنك قوله .
- ٤ - يمكننا تقدير درجة حرارة سطح الشمس عن طريق قياس العلاقة بين الضوء الصادر منها والطول الموجى . اشرح كيف يمكن عمل هذا التقدير .
- ٥ - نحن نعلم أن الشحنة محفوظة . هل يعنى هذا أن عدد الشحنات الموجبة والسالبة الموجودة الآن في الكون هو نفس العدد الذى كان موجودا في الشهاب المتوهج الأصيل ؟
- ٦ - حين ننظر إلى الكون ، فإننا نجد أن جميع المجرات تطير بعيدا عنا . هل يعنى هذا أننا لازلنا عند موقع الشهاب المتوهج الأصيل ؟
- ٧ - حيث أنه لا توجد دلائل على وجود حياة على المجموعة الشمسية فيما عدا الأرض ؟ فإن أقرب الجيران الذى يمكن اتخاذهم يمكن أن يوجدوا فوق كوكب لأقرب نجم إلينا وهو ألفا قنطورس الذى يبعد عنا مسافة $4 \times 10^{16} \text{ m}$. كم من الوقت تستغرقه سفينة فضاء خالية لكي تصل إلى هناك ؟ وم تستغرق سفينة فضاء تنتقل بسرعة قدرها $0.99c$ ؟ (ق) .
- ٨ - لقد تكونت الأرض منذ حوالى 5 بلايين من السنين . لماذا كانت الأرض أكثر فعالية اشعاعية بكثير عما هي الآن ؟ وهل تتوقع أن تكون أنواع النشاط الاشعاعى اليوم هي نفس ماكانت عليه قديما ؟
- ٩ - أننا نفترض عادة ان تسخين المادة المشعة لن يغير من عمر النصف لها . ماهي درجة السخونة في تقديرك التى يصبح عندها هذا الفرض خاطئا (قد ترغب في استعمال حقيقة أن الطاقة الحرارية عند 300 k تبلغ حوالى $1/40 \text{ eV}$) . (ق)
- ١٠ - إذا كانت حرارة الفضاء الخارجى هي حقيقة 270°C - فلم لايتجمد الملاحون الفضائيون حتى الموت أثناء رحلات الفضاء ؟ أنهم - حقيقة - يحتاجون إلى تبريد على سطح القمر . لماذا ؟
- ١١ - لم لا يحتوى القمر على أى جو ؟
- ١٢ - تكون درجة الحرارة داخل الناجم العميقة منتظمة على مدار السنة . مالذى تشير اليه هذه الحقيقة حول مصدر الحرارة في النجم ؟
- ١٣ - لو أن درجة حرارة الشهاب المتوهج كانت $k 10^{12}$ وكان حجمه $m 10^{10}$ فما تقديرك لكتلة الكون إذا كان عليه أن يكون نابضا ؟ هل هذا التقدير يعتبر حدا أعلى أو أدنى ؟ (
- ١٤ - ماهو عمر قطعة من الخشب إذا كان ماتحتويه من ^{14}C يبلغ عشر ماهو موجود في الأشجار حاليا ؟ ماهي العوامل التى قد تجعل تقديرك خاطئا ؟
- ١٥ - تتلقى الأرض من الشمس طاقة بمعدل متوسط يبلغ $2 \text{ cal}/(\text{m}^2)(\text{min})$ تقريبا . قدر كمية الايدروجين التى تتحول يوميا إلى هيليوم داخل الشمس .

ملحق « ١ »

تحويل الوحدات

كثيرا مايحدث أن نريد تحويل كمية معبرا عنها بمجموعة معينة من الوحدات إلى مجموعة أخرى من الوحدات . ومن الأمثلة النموجية، قد نود معرفة عدد الكيلومترات التي تكافئ 20 mi . ولأجراء مثل هذا التحويل نستخدم عوامل التحويل . ولنحاول معرفة ماهو عامل التحويل هذا .

نعرف ، على سبيل المثال ، أن

$$100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

وبالقسمة على 100 cm نجد أن

$$1 = \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0.010 \text{ m/cm}$$

هذا هو عامل التحويل بين الامتار والسنتيمترات . لاحظ أن عامل التحويل يساوى الوحدة . وعندما نضرب أية كمية في عامل التحويل فكأنما ضربناها في الوحدة أى أن قيمة هذه الكمية لن تتغير . وسنقوم الآن بعرض عدد من الأمثلة التي يستخدم فيها عامل التحويل .

١ - ماهو عدد الأمتار الموجودة في 30 mi ؟ يمكننا الحصول على عامل التحويل المناسب من المعادلة $1 \text{ mi} = 1.600 \text{ km}$ ولذا فهو يساوى 1.60 km/mi . وحيث أن عامل التحويل يساوى الوحدة فإننا نستطيع أن نضرب به أو نقسم عليه دون أن تتغير قيمة الكمية . ومن ثم ،

$$30 \text{ mi} = (30 \text{ mi}) \left(1.60 \frac{\text{km}}{\text{mi}} \right) = 48 \text{ km}$$

٢ - ماعدد الساعات التي تقع في 200,000 s ؟ (نعلم أن $1 \text{ h} = 60 \text{ min}$ وأن $60 \text{ s} = 1 \text{ min}$ ،

$$\begin{aligned} 200,000 \text{ s} &= (200,000 \text{ s}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = \frac{20,000}{6} \text{ min} \\ &= \left(\frac{20,000}{6} \text{ min} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right) = 55.6 \text{ h} \end{aligned}$$

هناك عوامل تحويل نموذجية على الغلاف الداخلى لهذا الكتاب .

ملحق « ٢ »

قوى العدد « ١٠ »

كثيرا مايكون من غير المناسب أن تكتب أرقاما مثل 1,420,000,000 أو 0.00031
فنفس هذه الأرقام يمكن كتابتها على الصورة 1.42×10^9 و 3.1×10^{-4} كما سنوضح بعد
قليلا .

اعتبر المتطابقات التالية

$$\begin{aligned} 1 &= 10^0 \\ 10 &= 10^1 \\ 100 &= (10)(10) = 10^2 \\ 1000 &= (10)(10)(10) = 10^3 \\ 1,000,000,000 &= 10^9 \end{aligned}$$

فلو أردنا أن نكتب الرقم 4,561,000,000 لوجدنا أن هذا الرقم مكافئ لضرب
4.561 في العدد ١٠ تسع مرات . (في كل مرة نضرب في العدد ١٠ تتحرك
العلامة العشرية رقما واحدا إلى اليمين) . ومن ثم

$$4,561,000,000 = 4.561 \times 10^9$$

وعلى العموم فإذا حركنا العلامة العشرية في رقم ما عدد q رقما إلى اليسار للزم أن
نضرب الرقم ف 10^q إذا أردنا للرقم أن يظل دون تغيير . وفي المثال السابق فإن $q=9$

وتتشابه عملية كتابة الأرقام الأقل من الوحدة مع العملية السابقة ، فنحن نستخدم
حقيقة أن .

$$0.1 = \frac{1}{10} = 10^{-1} = 1 \times 10^{-1}$$

$$0.01 = \frac{1}{100} = \frac{1}{10^2} = 10^{-2} = 1 \times 10^{-2}$$

$$0.001 = \frac{1}{1000} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3} = 1 \times 10^{-3}$$

$$0.000,000,01 = \frac{1}{10^8} = 10^{-8} = 1 \times 10^{-8}$$

من الواضح أنه عندما نحرك العلامة العشرية q رقما إلى اليمين فإننا يجب أن نضرب
الرقم في 10^q وفي المثال الذي ذكرناه في الأول وهو $0.00031 = 3.1 \times 10^{-4}$ كانت قيمة q
هي 4 ، وذلك لأن العلامة العشرية قد حركت أربعة أرقام .

ملحق « ٣ » الجدول الدوري للعناصر

القيم المدرجة في هذا الجدول وضعت على أساس أن $^{12}\text{C} = 12$ بالضغط بالنسبة للعناصر المنتجة صناعياً فإن الوزن الذري التقريبي لمعظم النظائر المستقرة معطى بين أقواس .

المجموعة		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0
الدورة	الفترة									
1	1	1 H 1.00797								2 He 4.003
	2	3 Li 6.939	4 Be 9.012	5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.9994	9 F 19.00		10 Ne 20.183
3	3	11 Na 22.990	12 Mg 24.31	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453		18 Ar 39.948
	4	19 K 39.102	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 27 Co 28 Ni 55.85 58.93 58.71	
5	5	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.909		36 Kr 83.80
	6	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc [98]	44 Ru 45 Rh 46 Pd 101.1 102.905 106.4	
6	7	47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.90		54 Xe 131.30
	8	55 Cs 132.905	56 Ba 137.34	57-71 Lanthanide series*	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 77 Ir 78 Pt 190.2 192.2 195.09	
7	9	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.98	84 Po [210]	85 At [210]		86 Rn [222]
	10	87 Fr [223]	88 Ra [226]	89-103 Actinide series†						

سلسلة اللانثانيدات	57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm [147]	62 Sm 150.35	63 Eu 152.0	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
سلسلة الاكتينيدات	89 Ac [227]	90 Th 232.04	91 Pa [231]	92 U 238.03	93 Np [237]	94 Pu [242]	95 Am [243]	96 Cm [247]	97 Bk [247]	98 Cf [251]	99 E [254]	100 Fm [253]	101 Md [256]	102 No [254]	103 Lw [257]

ملحق « ٤ »

جدول مختصر للنظائر

وضعت القيم المدرجة هنا على أساس أن $^{12}_6\text{C} = 12 \text{ u}$ بالضبط . ضمننت كتل الالكترونات .

العدد الذرى Z	الرمز	متوسط الكتلة الذرية	العنصر	عدد الكتلة A	التوفر النسبي ، %	كتلة النظير
ATOMIC NUMBER Z	SYMBOL	AVERAGE ATOMIC MASS	ELEMENT	MASS NUMBER A	RELATIVE ABUNDANCE %	MASS OF ISOTOPE
1	H	1.00797	Hydrogen	1	99.985	1.007825
				2	0.015	2.014102
2	He	4.0026	Helium	3	0.00015	3.016030
				4	100—	4.002604
3	Li	6.939	Lithium	6	7.52	6.015126
				7	92.48	7.016005
4	Be	9.0122	Beryllium	9	100—	9.012186
5	B	10.811	Boron	10	18.7	10.012939
				11	81.3	11.009305
6	C	12.01115	Carbon	12	98.892	12.0000000
				13	1.108	13.003354
7	N	14.0067	Nitrogen	14	99.635	14.003074
				15	0.365	15.000108
8	O	15.9994	Oxygen	16	99.759	15.994915
				17	0.037	16.999133
				18	0.204	17.999160
9	F	18.9984	Fluorine	19	100	18.998405
10	Ne	20.183	Neon	20	90.92	19.992440
				22	8.82	21.991384
11	Na	22.9898	Sodium	23	100—	22.989773
12	Mg	24.312	Magnesium	24	78.60	23.985045
13	Al	26.9815	Aluminum	27	100	26.981535
14	Si	28.086	Silicon	28	92.27	27.976927
				30	3.05	29.973761
15	P	30.9738	Phosphorus	31	100	30.973763
16	S	32.064	Sulfur	32	95.018	31.972074
17	Cl	35.453	Chlorine	35	75.4	34.968854
				37	24.6	36.965896
18	Ar	39.948	Argon	40	99.6	39.962384
19	K	39.102	Potassium	39	93.08	38.963714
20	Ca	40.08	Calcium	40	96.97	39.962589
21	Sc	44.956	Scandium	45	100	44.955919
22	Ti	47.90	Titanium	48	73.45	47.947948
23	V	50.942	Vanadium	51	99.76	50.943978
24	Cr	51.996	Chromium	52	83.76	51.940514
25	Mn	54.9380	Manganese	55	100	54.938054
26	Fe	55.847	Iron	56	91.68	55.934932
27	Co	58.9332	Cobalt	59	100	58.93319
28	Ni	58.71	Nickel	58	67.7	57.93534
				60	26.23	59.93032

العدد الذري Z ATOMIC NUMBER Z	الرمز SYMBOL	متوسط الكتلة الذرية AVERAGE ATOMIC MASS	العنصر ELEMENT	عدد الكتلة A MASS NUMBER A	النسبة النسبية ، % RELATIVE ABUNDANCE, %	كتلة النظير MASS OF ISOTOPE
29	Cu	63.54	Copper	63	69.1	62.92959
30	Zn	65.37	Zinc	64	48.89	63.92914
31	Ga	69.72	Gallium	69	60.2	68.92568
32	Ge	72.59	Germanium	74	36.74	73.92115
33	As	74.9216	Arsenic	75	100	74.92158
34	Se	78.96	Selenium	80	49.82	79.91651
35	Br	79.909	Bromine	79	50.52	78.91835
36	Kr	83.30	Krypton	84	56.90	83.91150
37	Rb	85.47	Rubidium	85	72.15	84.91171
38	Sr	87.62	Strontium	88	82.56	87.90561
39	Y	88.905	Yttrium	89	100	88.90543
40	Zr	91.22	Zirconium	90	51.46	89.90432
41	Nb	92.906	Niobium	93	100	92.90602
42	Mo	95.94	Molybdenum	98	23.75	97.90551
43	Tc	*	Technetium	98		97.90730
44	Ru	101.07	Ruthenium	102	31.3	101.90372
45	Rh	102.905	Rhodium	103	100	102.90480
46	Pd	106.4	Palladium	106	27.2	105.90320
47	Ag	107.870	Silver	107	51.35	106.90497
48	Cd	112.40	Cadmium	114	28.8	113.90357
49	In	114.82	Indium	115	95.7	114.90407
50	Sn	118.69	Tin	120	32.97	119.90213
51	Sb	121.75	Antimony	121	57.25	120.90375
52	Te	127.60	Tellurium	130	34.49	129.90670
53	I	126.9044	Iodine	127	100	126.90435
54	Xe	131.30	Xenon	132	26.89	131.90416
55	Cs	132.905	Cesium	133	100	132.90509
56	Ba	137.34	Barium	138	71.66	137.90501
57	La	138.91	Lanthanum	139	99.911	138.90606
58	Ce	140.12	Cerium	140	88.48	139.90528
59	Pr	140.907	Praseodymium	141	100	140.90739
60	Nd	144.24	Neodymium	144	23.85	143.90998
61	Pm	*	Promethium	145		144.91231
62	Sm	150.35	Samarium	152	26.63	151.91949
63	Eu	151.96	Europium	153	52.23	152.92086
64	Gd	157.25	Gadolinium	158	24.87	157.92410
65	Tb	158.924	Terbium	159	100	158.92495
66	Dy	162.50	Dysprosium	164	28.18	163.92883
67	Ho	164.930	Holmium	165	100	164.93030
68	Er	167.26	Erbium	166	33.41	165.93040
69	Tm	168.934	Thulium	169	100	168.93435
70	Yb	173.04	Ytterbium	174	31.84	173.93902
71	Lu	174.97	Lutetium	175	97.40	174.94089
72	Hf	178.49	Hafnium	180	35.44	179.94681
73	Ta	180.948	Tantalum	181	100	180.94798
74	W	183.85	Tungsten	184	30.6	183.95099
75	Re	186.2	Rhenium	187	62.93	186.95596
76	Os	190.2	Osmium	192	41.0	191.96141
77	Ir	192.2	Iridium	193	61.5	192.96328
78	Pt	195.09	Platinum	195	33.7	194.96482
79	Au	196.967	Gold	197	100	196.96655
80	Hg	200.59	Mercury	202	29.80	201.97063
81	Tl	204.37	Thallium	205	70.50	204.97446
82	Pb	207.19	Lead	208	52.3	207.97664
83	Bi	208.980	Bismuth	209	100	208.98042
84	Po	[210]	Polonium	210		209.98287
85	At	*	Astatine	211		210.98750
86	Rn	*	Radon	211		210.99060
87	Fr	*	Francium	221		221.01418

العدد الذرى Z	الرمز SYMBOL	متوسط الكتلة الذرية AVERAGE ATOMIC MASS	العنصر ELEMENT	عدد الكتلة A MASS NUMBER	التوفر النسبى ، % RELATIVE ABUNDANCE, %	كتلة النظير MASS OF ISOTOPE
88	Ra	[226]	Radium	226		226.02536
89	Ac	*	Actinium	225		225.02314
90	Th	[232.038]	Thorium	232	100	232.03821
91	Pa	[231]	Protactinium	231		231.03594
92	U	[238.03]	Uranium	233		233.03950
				235	0.715	235.04393
				238	99.28	238.05076
93	Np	*	Neptunium	239		239.05294
94	Pu	*	Plutonium	239		239.05216
95	Am	*	Americium	243		243.06138
96	Cm	*	Curium	245		245.06534
97	Bk	*	Berkelium	248		248.070305
98	Cf	*	Californium	249		249.07470
99	Es	*	Einsteinium	254		254.08811
100	Fm	*	Fermium	252		252.08265
101	Md	*	Mendelevium	255		255.09057
102	No	*	Nobelium	254		254
103	Lw	*	Lawrencium	257		257

* لم تدرج الكتل الذرية للعناصر غير المستقرة مالم يكن النظير المعطى هو النظير الأساسى .

ملحق « ٥ »

الدوال المثلثية

ANGLE deg	SINE	CO- SINE	TAN- GENT
0°	0.000	1.000	0.000
1°	.018	1.000	.018
2°	.035	0.999	.035
3°	.052	.999	.052
4°	.070	.998	.070
5°	.087	.996	.088
6°	.105	.995	.105
7°	.122	.993	.123
8°	.139	.990	.141
9°	.156	.988	.158
10°	.174	.985	.176
11°	.191	.982	.194
12°	.208	.978	.213
13°	.225	.974	.231
14°	.242	.970	.249
15°	.259	.966	.268
16°	.276	.961	.287
17°	.292	.956	.306
18°	.309	.951	.325
19°	.326	.946	.344
20°	.342	.940	.364
21°	.358	.934	.384
22°	.375	.927	.404
23°	.391	.921	.425
24°	.407	.914	.445
25°	.423	.906	.466
26°	.438	.899	.488
27°	.454	.891	.510
28°	.470	.883	.532
29°	.485	.875	.554
30°	.500	.866	.577

ANGLE deg	SINE	CO- SINE	TAN- GENT
31°	.515	.857	.601
32°	.530	.848	.625
33°	.545	.839	.649
34°	.559	.829	.675
35°	.574	.819	.700
36°	.588	.809	.727
37°	.602	.799	.754
38°	.616	.788	.781
39°	.629	.777	.810
40°	.643	.766	.839
41°	.658	.755	.869
42°	.669	.743	.900
43°	.682	.731	.933
44°	.695	.719	.966
45°	.707	.707	1.000
46°	.719	.695	1.036
47°	.731	.682	1.072
48°	.743	.669	1.111
49°	.755	.656	1.150
50°	.766	.643	1.192
51°	.777	.629	1.235
52°	.788	.616	1.280
53°	.799	.602	1.327
54°	.809	.588	1.376
55°	.819	.574	1.428
56°	.829	.559	1.483
57°	.839	.545	1.540
58°	.848	.530	1.600
59°	.857	.515	1.664
60°	.866	.500	1.732

ANGLE deg	SINE	CO- SINE	TAN- GENT
61°	.875	.485	1.804
62°	.883	.470	1.881
63°	.891	.454	1.963
64°	.899	.438	2.050
65°	.906	.423	2.145
66°	.914	.407	2.246
67°	.921	.391	2.356
68°	.927	.375	2.475
69°	.934	.358	2.605
70°	.940	.342	2.757
71°	.946	.326	2.904
72°	.951	.309	3.078
73°	.956	.292	3.271
74°	.961	.276	3.487
75°	.966	.259	3.732
76°	.970	.242	4.011
77°	.974	.225	4.331
78°	.978	.208	4.705
79°	.982	.191	5.145
80°	.985	.174	5.671
81°	.988	.156	6.314
82°	.990	.139	7.115
83°	.993	.122	8.144
84°	.995	.105	9.514
85°	.996	.087	11.43
86°	.998	.070	14.30
87°	.999	.052	19.08
88°	.999	.035	28.64
89°	1.000	.018	57.29
90°	1.000	.000	∞

الزاوية ، درجة : Angle, deg

جيب الزاوية، جا : Sine

جيب تمام الزاوية، جتا : Cosine

ظل الزاوية، ظا : Tangent

ملحق « ٦ »

الأجوبة

الفصل الأول

1. 10 blocks; 53° north of east
3. 71 km west; 71 km south
5. 14.2 cm at 257°
7. 953 mi north; 550 mi west
9. 3.38 N at 331°
11. 13.1 lb; 10.5 lb
13. 5.0 lb at 90°

15. 5.8 cm/s at 31° east of south
17. 50 lb; 100 lb
19. 432 lb
21. W_2 ; 3
23. 28 N; 80 N
25. 88 N; 38 N, 94 N, 32 N

الفصل الثاني

1. 91.4 mi/h = 147 km/h
3. 0.49 cm/yr; 49 cm/century upward
5. 1 cm/s; 0.86 cm/s; -0.40 cm/s;
 -1.0 cm/s; zero
7. 80 m
9. 1.4 m/s²; 280 m
11. 3.2×10^5 m/s²; 4.7×10^{-4} s

13. $L/200$ s⁻²; 156 s
15. 100 ft; 2.5 s
17. 198 m/s
19. 2.76 s; 20 m/s
21. 8.89 s; 133 m
23. 2.67 m/s²
25. 0.495 s; 4.85 m/s

الفصل الثالث

1. 140 N
3. 50 lb
5. 1000 N = 225 lb
 3.6×10^4 lb
9. 210 lb; 110 lb
11. 0.98 ft
13. 6.8 ft/s²

15. 3.82 m/s²; 9.6 N; 0.90 m/s²; 14.2 N
17. 47 N; 1.43 s
19. 4.9 m/s²; 14.7 N
21. 1.73 m/s²; no
23. $F/2m$; $(F - 2f)/2m$
25. 1.84 m/s²; 3.68 m/s²; 0.735 N; 2.39 N

الفصل الرابع

1. 1.86×10^{-40} N; F_G ; $W = 1.14 \times 10^{-14}$
3. 1.34
5. 501 lb
7. 79 m
9. 411 lb
11. 2920 N

13. 78 m
15. 33 m; 6.2 W
17. (a) 64 m; (b) 3.70 s
21. 2.71 m/s²; 50 N
23. 0.977 m/s²; 17.6 N; 105 N

الفصل الخامس

1. 88 J
3. 2×10^4 ft · lb
5. (a) 3.23×10^8 J; (b) 181 hp

7. 2250 lb
9. (a) 8.2×10^4 ft · lb; (b) $\frac{1}{41}$
11. 0.163 W

15. (a) Yes; (b) 20.4 m
17. 4.43, 2.42, and 3.13 m/s
21. 7.2 m/s
23. 6.8 m/s
25. (a) 20; (b) 15; (c) 0.75
27. (a) 8.33; (b) 10; (c) 83%
29. 0.59 hp

31. (a) 265 N; (b) 0.027 N

الفصل السادس

1. $m\sqrt{2gh}$
3. (a) 1600 lb; (b) 200 ft
5. 7200 N
7. (a) 0.143 m/s; (b) 0.048 N
9. 673 m/s
11. 0.30 m/s

13. Zero
15. h ; h
17. $-\frac{1}{2}v_0$; $\frac{1}{2}v_0$
19. (b) Two masses fly off
21. Four times atmospheric

الفصل السابع

1. (a) 25° , 0.069 rev, 0.436 rad; (b) 464° , 1.29 rev, 8.1 rad; (c) 263° , 0.73 rev, 4.59 rad
3. (a) 0.80 rev/s²; (b) 160 rev
5. 1.13 rev/s
7. (a) 463 m/s; (b) zero
9. 565 in.

11. 90 rev
13. 9000 lb
15. 0.57
17. 2.42 m/s
19. 9.5×10^{-8} N
21. 4.74 N
25. 0.55°

الفصل الثامن

1. (a) L , 0.77 L , 0.33 L , 0.29 L ; (b) $-FL$, 0.77 FL , 0.33 FL , 0.29 FL
3. 70 lb
5. (a) 1170 N; (b) 752 N, 100 N
7. (a) 2.77 F ; (b) $-0.45F$, 3.47 F
9. 1450 N; 1000 N; 500 N; 2410 N
11. (a) 4.25 kg · m²; (b) 7.06 kg · m²; (c) 0.92 m, 1.19 m

13. 1×10^{-3} kg · m²
15. 0.80 N · m
17. (a) 0.125 lb · ft; (b) 20 rad
19. (a) 7200 slug · ft²; (b) 15.99 lb
21. (a) 3.03 m/s; (b) 9.65 rev/s
25. 0.388 rev/s

الفصل التاسع

1. 7.92 g/cm³
3. 0.070 m³
5. 9.1×10^{-4} m
7. 1.39×10^{-4}
11. (a) 6.1×10^{-7} ; (b) 10^7 N/m²
13. 6.08×10^3 N = 1370 lb
15. (a) 10.34 m; (b) 10.34 m
17. 0.87 g/cm³

19. 0.95 g/cm³
21. 0.75 g/cm³
23. 21.6 g
25. 0.895
29. (a) 4.87×10^{-6} N; (b) 1.334×10^{-5} N; (c) 4.28×10^{-3} m/s
31. (a) 56.7 ft/s; (b) 3.9×10^{-3} ft³ = 6.8 in³
33. 3.81 N

الفصل العاشر

1. (a) 25°C , 298 K ; (b) -35°C , 238 K
3. -38°F ; 675°F
5. (a) 131°C ; (b) 10.5 atm

الفصل الحادى عشر

1. (a) 24.8 cal ; (b) 0.0984 Btu
3. (a) 48.4 Btu ; (b) $12,200\text{ cal}$
5. 65°C
7. 78 g
9. 8.0 g
11. 46.9 g
13. $8400, 8400, 8400, 8300, 8500, 8400$, and $8400\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{mol})(\text{K})$
15. 24.3°C
17. 7.86 g

7. 177°C
9. 0.449 cm^3
11. (a) $1.30 \times 10^{-25}\text{ kg}$; (b) 6.8×10^{21}
13. (a) $5.5 \times 10^{-11}\text{ kg} \cdot \text{mol}$; (b) 3.3×10^{10}
15. $1.36 \times 10^6\text{ N/m}^2 = 13.4\text{ atm}$
17. $22.4 \times 10^{-3}\text{ m}^3$
19. (a) $4.1 \times 10^{-22}\text{ atm}$; (b) $6.2 \times 10^{-23}\text{ J}$; (c) 273 m/s
21. (a) $8.15 \times 10^4\text{ N/m}^2$, $1.92 \times 10^4\text{ N/m}^2$, $0.066 \times 10^4\text{ N/m}^2$; (b) $1.01 \times 10^5\text{ N/m}^2$
23. $42,300\text{ kg/kg} \cdot \text{mol}$

19. 0.55 cal/g
21. 0°C
25. 0.075%
27. 395°C
29. 1.23 cm^3
31. 5820 lb/in^2
33. 15.1 cal
35. $2.01 \times 10^5\text{ cal}$
39. (a) 13.50 g/m^3 ; (b) 79%
41. 21%

الفصل الثانى عشر

1. (a) 5020 J ; (b) larger
3. (a) 45 J ; (b) zero
5. (a) 606°C , 1192°C , 215°C ; (b) yes, no, no, yes
7. 6960 J
9. (a) $1.00 \times 10^6\text{ N/m}^2$; (b) 460°C

11. (a) 9.2 hp ; (b) 5.2 g
13. 0.58
15. (a) no; (b) 2; (c) 4; (d) 7
17. (a) 9.8×10^{-4} ; (b) 9.8×10^{-3}
19. (a) Zero; (b) $-1.38 \times 10^{-23}\ln 5$ or $2.22 \times 10^{-23}\text{ J/K}$

الفصل الثالث عشر

1. (a) 0.333 Hz ; (b) 3.0 s ; (c) 7.0 cm
3. (a) $1.93 \times 10^{-4}\text{ m}$; (b) 36 Hz
5. $2.19 \times 10^{-3}\text{ J}$
7. (a) 0.090 m/s^2 ; (b) 0.052 m/s
9. (a) 3.0 Hz ; (b) 15 cm ; (c) 2.83 m/s ; (d) zero

11. (a) 53 m/s^2 ; (b) zero; (c) $53\cos\theta\text{ m/s}^2$
13. (a) 9.8 m/s^2 ; (b) 1.76 Hz
15. (a) 1.28 Hz ; (b) 2.54 ft/s
17. (a) 1.80 Hz ; (b) 1.89 ft/s
19. 0.389 m
23. 0.0316 m

الفصل الرابع عشر

1. 1.80 s
3. (a) 30 m ; (b) 600 m/s
5. $8.0 \times 10^{-3}\text{ N}$
7. (a) 0.53 m ; (b) 267 m/s
9. (a) Lowest frequency; (b) 4

11. $20, 40, 80$, and 100 Hz
13. 5000 Hz
15. $1250, 3750$, and 6250 Hz
17. $0.32, 0.64$, and 0.95 Hz

الفصل الخامس عشر

1. 2040 m
3. $4.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$
5. 2.9%
7. 73 dB
9. (a) 10^{-6} W/m^2 ; (b) 1.33
11. (a) ± 34 , ± 68 , and $\pm 102 \text{ cm}$; (b) ± 17 , ± 51 , and $\pm 85 \text{ cm}$
13. 113, 340, and 567 Hz
15. 1700 Hz
17. 0.065 and $n \times 0.065 \text{ Hz}$
19. 31 m/s
21. (a) 2202 and 2198 Hz
23. 2988 Hz

الفصل السادس عشر

1. 1200 N
3. (a) $8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$; (b) $2.2 \times 10^8 \text{ m/s}$
5. 4.79 N at -45°
7. (a) $-9 \times 10^5 \text{ N/C}$; (b) $3.11 \times 10^5 \text{ N/C}$
9. $6.4 \times 10^6 \text{ N/C}$ down
11. (a) $9.6 \times 10^{-18} \text{ J}$; (b) $-9.6 \times 10^{-18} \text{ J}$
13. (a) 2.0 cm; (b) $4.8 \times 10^{-17} \text{ N}$
15. (a) $2.4 \times 10^5 \text{ V}$; (b) zero
17. (a) 2 A, 5 A, 27 V; (b) $50 \mu\text{C}$
 $-1.80 \times 10^6 \text{ V}$
19. (a) $1.225 \times 10^5 \text{ V/m}$; (b) $3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$
21. (a) 25 cm from $3 \mu\text{C}$; (b) unstable

الفصل السابع عشر

1. (a) $2.05 \times 10^6 \text{ m/s}$; (b) 12 eV
3. (a) 1500 eV; (b) 3500 eV; (c) 3000 and 2000 eV
5. (a) 2400 C; (b) 1.5×10^{22}
7. 240 Ω
9. (a) 0.0161 Ω ; (b) 0.48 V
11. 24 Ω
13. 130 Ω
15. $1.8 \times 10^{-7} \text{ C}$
17. $4.73 \times 10^{-8} \text{ F}$
19. (a) 36 nC; (b) 13.3 V; (c) $24 \times 10^{-9} \text{ J}$
(d) $24 \times 10^{-9} \text{ J}$

الفصل الثامن عشر

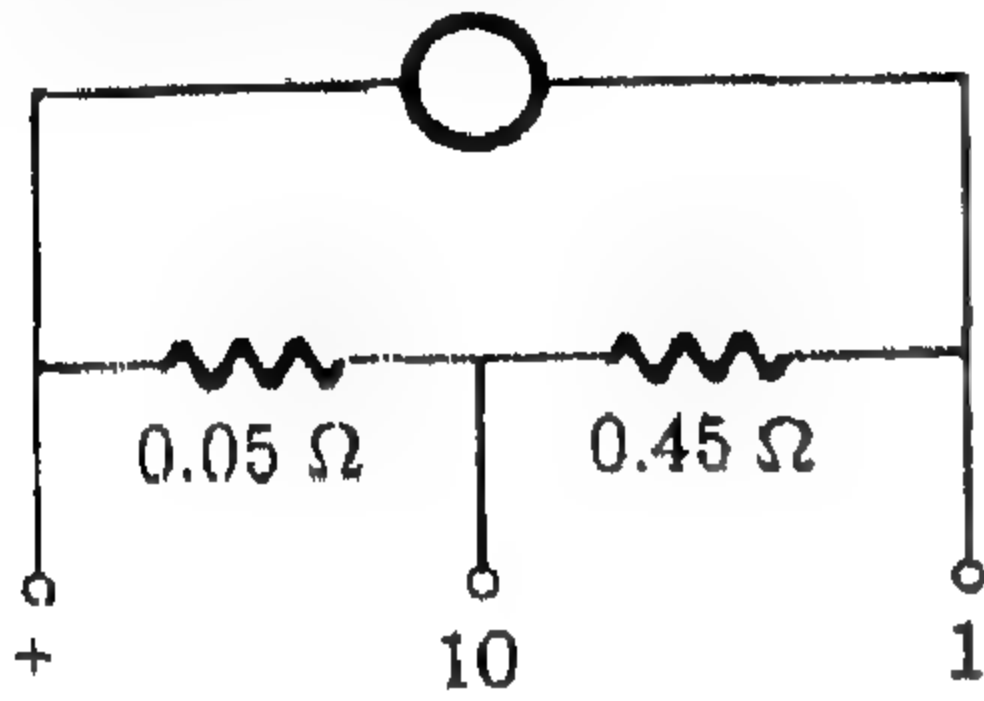
1. (a) 6 Ω ; (b) 2.0 A
3. (a) 12 Ω ; (b) 8 Ω
5. 1.33 μF
7. 3.33, 0.50, and -3.83 A
9. 0, 0 A; 42 μC
11. (a) 2.15 Ω ; (b) 29 V
13. (a) 1.14 A; (b) 6.3 V
15. 15.3 A
17. (a) 2 A, 5 A, 27 V; (b) $50 \mu\text{C}$
19. 2, 14, 3, and 9 A
21. (a) 12 V; (b) 24 μC ; 48 μC
23. $\frac{2}{3} \Omega$

الفصل التاسع عشر

1. (a) 0.024 N; (b) into earth
3. (a) 0.0083 N; (b) west
5. (a) $1.2 \times 10^{-6} \text{ T}$; (b) north
7. 1250 A
9. (a) 0.0314 T; (b) 1.57 T; (c) $2.2 \times 10^{-5} \text{ Wb}$
11. (a) $1 \times 10^{-5} \text{ T}$; (b) $2 \times 10^{-4} \text{ N}$, repulsion; (c) $2 \times 10^{-4} \text{ N}$
13. $11.2 \times 10^{-4} \text{ T}$
15. Along the line $y = -2x$
17. 0.167 m
19. Circle perpendicular to B; $r = 1.14 \text{ m}$
21. Helix with $r = 0.52 \text{ cm}$ and pitch = 5.7 cm
23. (a) 6.3×10^{14} ; (b) $1 \times 10^{-9} \text{ T}$; (c) clockwise
25. $3.5 \times 10^6 \text{ m/s}$

الفصل العشرون

1. 0.050Ω shunt
3. 1950Ω in series
- 5.



7. $0.188 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
9. (a) $1.91 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$; (b) north
11. 5.0 V
13. 1.50 T
15. (a) 2.0 V ; (b) 0.10 H
17. (a) 0.0036 V
19. (a) 110 V ; (b) 24 A

الفصل الحادي والعشرون

1. (a) 8.0 s ; (b) 8.0 s ; (c) $1.6 \times 10^{-5} \text{ C}$; (d) $2.0 \times 10^{-6} \text{ A}$
3. 2.83 A
5. 250 W
7. 0.45 A
9. (a) 377 V ; (b) $3.77 \times 10^8 \text{ V}$
11. (a) 0.036 A ; (b) 3.6 A ; (c) zero

13. 2.36 A
15. (a) $70 \mu\text{F}$; (b) 7.0 H
17. (a) 0.66 H or 0.74 H ; (b) 47 mH
19. (a) 0.10 A ; (b) 0.10 W ; (c) 0.10
21. (a) 180 W ; (b) 0.092 H
23. 41.7 on 120 V ; no
25. 100

الفصل الثاني والعشرون

1. (a) $5.2 \times 10^{-20} \text{ J}$; 0.32 eV
3. (a) $3.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$; (b) 3500 times larger
5. 0.20 or 20%
7. (a) 0.80 Hz ; (b) $3.75 \times 10^8 \text{ m}$

9. 14.7 s
11. Of the order of $1 \times 10^{-8} \text{ V}$
13. (a) $8.3 \times 10^{-8} \text{ m}$; (b) long x-rays

الفصل الثالث والعشرون

1. Right
3. $2.03 \times 10^8 \text{ m/s}$
5. $3.9 \times 10^8 \text{ m}$
7. (a) 24° ; (b) 0°
9. 37° ; 29.3°
11. (a) 1.414 at least
13. (a) -8.33 cm ; (b) 0.50 cm ; (c) virtual, erect; (d) -6.67 cm , 1.00 cm virtual, erect; (e) -3.33 cm , 2.0 cm , virtual, erect

15. (a) 200 cm ; (b) no; (c) same
17. (a) 30 cm ; (b) 10 cm
19. (a) 25 cm , 0.75 cm , real, inverted; (b) 40 cm , 3.0 cm , real, inverted; (c) -20 cm , 6.0 cm , virtual, erect
21. (a) $p = 2f$; (b) real
23. (a) 75 cm past second lens; (b) 0.50
25. (a) 11.2 cm past first lens; (b) 0.75
27. Left of lens: 4, 4, and 8 cm

الفصل الرابع والعشرون

1. (a) 2.0 cm; (b) 1.85 cm
3. (a) Farsighted; (b) converging, 43 cm
5. Infinity; 150 cm
7. 16.7 cm
9. 8.0 m
11. (a) 5.83 diopters; (b) 17.1 cm
13. 8.3
15. (a) About 17 cm; (b) about 3.5
17. 200 km
19. (a) 45°; (b) 38°

الفصل الخامس والعشرون

1. (a) Zero; (b) 50 cm; (c) 150 cm; (d) 125 cm
3. ± 0.025 , ± 0.050 , and ± 0.075 cm
5. 0.020 cm
7. 250, 500, 750, and 1000 nm
9. 1.6×10^{-6} m
11. 5.52×10^{-4} m
13. (a) Zero or 152 nm
15. 36.1°
17. 19.4°
19. (a) No; (c) yes; (d) ratio of orders must be 3:2
21. 5.0 cm
23. 0.226 cm

الفصل السادس والعشرون

1. 5.6×10^{-20} J = 0.35 eV
3. (a) Infrared; (b) 4130 Å
5. (a) 2590 Å; (b) ultraviolet
7. (a) 3.2×10^{-5} m; (b) infrared
9. 2.8 eV
11. 91.2 nm
13. Will live 10,013 s; yes
15. (a) 5.2×10^{-27} kg; (b) 0.948c
17. 2.8×10^{-12} kg
19. c
21. 7.3×10^6 m/s
23. (a) 1.46×10^6 m/s; (b) 1.005 nm; 1.46×10^6 m/s

الفصل السابع والعشرون

1. (a) $(3.6 \times 10^{-26})/r$ J; (b) 4.7×10^{-14} m
3. (a) 9.50×10^{-8} m; (b) 3.97×10^{-8} m
5. 0.052
7. (a) 1.59×10^6 m/s; (b) 2.53×10^{15} Hz; (c) 1.18×10^{-7} m
9. 10
11. 0.062 nm
13. (a) 72 cal/s; (b) 215°C
15. 1879, 656, 486, 122, 103, and 97 nm
17. (a) 3000 eV
19. $600 \pm 1.200 \times 10^{-12}$ nm

الفصل الثامن والعشرون

1. (a) 1.2×10^{-15} m; (b) 2.3×10^{14} g/cm³
3. 11.55 cm
5. 65.03 u
7. $^{208}_{82}\text{Pb}$
9. (a) 6.3×10^6 s⁻¹; (b) 170 μCi
11. 8.9×10^{-4} g
13. 92 MeV
15. 2.15×10^{-3} u
17. 60 mrem
19. (a) 5.7×10^{14} J; (b) 1.82×10^{11} °C

قائمة المصطلحات العلمية Glossary

الفصل الأول

Tension	شد
Diagram	رسم بياني (رسم تخطيطي)
Diagram, schematic	رسم بياني تخطيطي
Force vector	متجه القوة
Free-body diagram	رسم بيان الجسم الحر
Force diagram	رسم بيان القوى
Velocity	سرعة
Speed	معدل الحركة (سرعة لائتجاهية)
Component	مركبة
Component, rectangular	مركبة متعامدة
Slash mark	علامة الشق الطول
Graphical method	الطريقة البيانية
Trigonometric method	الطريقة المثلثية
Trigonometric function	دالة مثلثية
Trigonometric tables	جداول النسب المثلثية
Trigonometry	علم حساب المثلثات
Physical universe	الكون الفيزيائي
Vector	متجه
Vector quantity	كمية موجهة
Vector force	قوة موجهة
Vector diagram	رسم بيان المتجهات
Vector displacement	إزاحة موجهة
Force	قوة
Pythagorean theory	نظرية فيثاغورث
Balanced force	قوة متزنة
Unbalanced force	قوة غير متزنة
Displacement	إزاحة
Magnitude	مقدار
Direction	اتجاه

Scalar quantity	كمية غير موجهة (لاموجهة)
Resultant	محصلة
Resultant displacement	إزاحة محصلة
Simultaneous equations	معادلات آنية
Lathe bench	مخرطة نضدية
Positioning device	جهاز تحديد الموضع
Frictionless	لا احتكاكي
Motion	حركة
Sine	جيب
Cosine	جيب تمام
Opposite side	الضلع المقابل
Adjacent side	الضلع المجاور
Hypotenuse	الوتر
Interpolation	الاستكمال من الداخل
Pound	باوند
Equilibrium	توازن (اتزان)
Balance	اتزان (توازن)
Gravitational attraction	تجاذب ثقالي
Weight	وزن
Pull of gravity	شد الجاذبية الأرضية
Cart	عربة صغيرة
Friction	احتكاك
Net force	صافي القوة
Newton	نيوتن

الفصل الثاني

Acceleration	تسارع (عجلة)
Uniformly accelerated motion	حركة منتظمة التسارع
Free fall	سقوط طليق
average speed	متوسط معدل الحركة
Average velocity	متوسط السرعة
Average velocity vector	متوسط متجه السرعة
Velocity vector	متجه السرعة
Displacement vector	متجه الإزاحة
Independent variable	متغير مستقل

Coordinates	إحداثيات
Coordinate axes	محاور الإحداثيات
Instantaneous speed	معدل الحركة اللحظى
Instantaneous velocity	سرعة لحظية
Limiting value	القيمة الحدية (أو النهائية)
Unit	وحدة
Dimension	بعد
Rod (unit)	قصبة (وحدة طول)
Conversion factor	معامل تحويل
Multiplying factor	معامل الضرب
Acre	فدان (انجليزى)
Hectar	هكتار
Uniform acceleration	تسارع منتظم
Quadratic equation	معادلة من الدرجة الثانية
Quadratic formula	صيغة تجذير معادلات الدرجة الثانية
Formula	صيغة
Vacuum	فراغ
Incline	مستوى مائل
Experimentation	تجريب (اختبار علمى)
Technique	أسلوب تقنى
Law of conservation of energy	قانون بقاء الطاقة
Free-fall acceleration	تسارع السقوط الذاتى (أو تسارع الجاذبية)
Ice age	العصر الجليدى
Continental drift	زحزحة القارات
Fluorescent material	مادة فلورية
Fluorescent	فلورى
Screen	ستار
Check point	نقطة المراجعة
Push	دفع
Speedboat	زورق بخارى سريع
Parachute	باراشوت

الفصل الثالث

Newton's first law of motion	قانون نيوتن الأول للحركة
Newton's second law of motion	قانون نيوتن الثانى للحركة

Newton's third law of motion

قانون نيوتن الثالث للحركة

Mathematics

علم الرياضيات

Calculus

حساب التفاضل والتكامل

Law of gravitation

قانون الجاذبية

Force of friction

قوة الاحتكاك

Action

فعل

Reaction

رد فعل

Action force

قوة الفعل

Reaction force

قوة رد الفعل

Mass

كتلة

Inertia

القصور الذاتي

Massiveness

امتلاء

Pulley

بكرة

Measure

مقياس

Intrinsic property

خاصية ذاتية

Proportion

تناسب

Proportionality constant

ثابت تناسب

Air track

مسار هوائي

Characteristic constant

ثابت مميز

Astronaut

رائد فضاء

Sattellite, earth's

تابع أرضي (أو قمر صناعي)

Weightlessness

انعدام الوزن

Weightless

عديم الوزن

Circular motion

حركة دائرية

Orbit

مدار

Unit, standard

وحدة قياسية

Unit of length

وحدة طول

Unit of time

وحدة زمن

Unit of mass

وحدة كتلة

Meter

متر

Meter, standard

المتر الإمام (العياري)

Temperature

درجة الحرارة

Wavelength

الطول الموجي

Time, standard

زمن إمامي (قياسي)

Mass, standard

كتلة إمامية (قياسية)

Mks system

النظام mks

Metric system

النظام المتري

SI system	النظام SI
Prototype	طراز بدئي
National Bureau of Standards	المكتب القومي للمقاييس العيارية
Secondary standard	مقياس إمامي ثانوي
Prefix	بادئة
Factor	معامل
Dyne	داين
Slug	سلج
Atwood's machine	آلة آتوود
Friction force	قوة احتكاك
Pushing force	القوة الدافعة
Maximum	نهاية عظمى
Coefficient of friction	معامل الاحتكاك
Coefficient of friction, dynamic	معامل الاحتكاك الديناميكي
Coefficient of friction, kinetic	معامل الاحتكاك الحركي
Coefficient of friction, static	معامل الاحتكاك الاستاتيكي
Normal force	قوة عمودية
Skidding	تزحلق
Sliding	انزلاق
Terminal velocity	سرعة نهائية

الفصل الرابع

Attraction	جذب ، تجاذب
Attraction force	قوة تجاذب
Attractive force	قوة جاذبة
Gravitational force	قوة الجذب
Gravitational attractive force	قوة جاذبة ثقافية
Gravitational attraction	تجاذب ثقافي
Gravitational field	مجال الجاذبية
Gravitational field strength	شدة مجال الجاذبية
Gravitation	جاذبية
Newton's law of gravitation	قانون نيوتن للجاذبية
Astronomer	عالم فلك
Solar system	النظام الشمسي
Planet	كوكب

Earth	الأرض
Moon	القمر
Planetary motion	حركة كوكبية
Gravitational constant	ثابت الجاذبية
Cavendish balance	ميزان كافنديش
Optical lever	ذراع بصري
Beam of light	شعاع ضوئي
Inclined axes	محاور مائلة
Trajectory	مسار المقذوف
Projectile	مقذوق
X-Rays	أشعة سينية (أشعة اكس)
High voltage	فلطية عالية
Discharge	تفريغ
Discharge tube	أنبوب تفريغ
Electrode	قطب كهربائي (الكترود)
Spark	شرارة
Glow	وهج
Potential difference	فرق جهد
Neon signs	إشارات النيون
Radiation	إشعاع
Heavy metals	فلزات ثقيلة
Over-exposure	تعرض مفرط
Time of flight	زمن الطيران
Asteroid	كويكب سيار
Planetoid	كويكب سيار
Hitch	وصلة جر
Trailer	مقطورة
Electron gun	مدفعة الكترونيات
Energy	طاقة
Conservation	بقاء ، حفظ
Mechanics	علم الميكانيكا
Work	شغل
Supporting force	قوة حاملة
Foot	قدم
Foot-pound	قدم - باوند
Joule	جول
Erg	إرج

Newton-meter	نيوتن - متر
Dyne-centimeter	داين - سنتيمتر
Dot product	حاصل ضرب نقطي
Scalar product	حاصل ضرب عددي
Rate	معدل
Power	قدرة
Watt	واط
Kilowatt	كيلوواط
Horsepower	القدرة الحصانية
Electricity	كهرباء ، كهربائية
Kilowatt hour	كيلوواط ساعة
Power output	قدرة الخرج
Power, output	خرج القدرة
Machine	مكنة (آلة)
Time of operation	زمن التشغيل
Motor	موتور ، محرك
Kinetic energy	طاقة حركة
Friction work	شغل احتكاك
Interrelation	علاقة متبادلة
Potential energy	طاقة وضع
Gravitational potential energy	طاقة وضع ثقالية
Loss	فقد ، فاقد
Gain	كسب ، زيادة
Conservative force	قوة احتفاظية
Electrostatic force	قوة استاتيكية كهربائية
Nuclear force	قوة نووية
Work-energy theorem	نظرية الشغل والطاقة
Work-energy equation	معادلة الشغل والطاقة
Pendulum	بندول
Battery	بطارية
Starter	بادىء تشغيل
Electrical energy	طاقة كهربائية
Nuclear energy	طاقة نووية
Chemical energy	طاقة كيميائية
Heat energy	طاقة حرارية
Combustion chamber	غرفة احتراق
Combustion products	نتاج الاحتراق

Cylinder	أسطوانة
Piston	كباس
Bearing	محمل ، كرسى تحميل
Perpetual-motion	مكنة الحركة الدائمة
Mechanism	آلية
Oil	زيت ، نفط ، بترول
Steam	بخار الماء (المغلى)
Fuel	وقود
Useful work	شغل نافع
Element	عنصر
Atom	ذرة
Nucleus	نواة
Nuclear reactor	مفاعل نووى
Geothermal	حرارى أرضى
Geothermal energy	طاقة حرارية أرضية
Solar heating	تسخين شمسى
Solar cell	خلية شمسية
Turbine	تربين ، تربينة
Ocean currents	تيارات محيطية
Fossil fuel	وقود احفورى
Device	نيطة جهاز
Mechanical device	جهاز ميكانيكى - نيطة آلية
Car jack	رافعة السيارة
Claw hammer	مطرقة مخليية
Compound pulley	بكرة مركبة
Simple pulley	بكرة بسيطة
Pulley system	مجموعات بكرات ، جهاز بكرات
Gear system	مجموعة تروس
Wheel	عجلة
Axle	محور العجلة
Block-and-tackle	بكارة ، بكرة وحبل
Circumference	محيط الدائرة
Nose cone	مخروط المقدمة
Seat belt	حزام تثبيت
Sliding friction	احتكاك انزلاقى
Locomotive	قاطرة
Wattage	واطية

Atom-smashing machine
Van de Graaf generator
Proton
Hydrogen
Reducing gear

مكنة تحطيم ذرية
مولد فان دجراف
بروتون
ايدروجين
ترس تخفيض السرعة

الفصل السادس

Momentum
Pressure
Ideal gas
Law of conservation of momentum
Thrust
Rocket
Collision
Impulse
Rest mass
Particle
System
Isolated system
Linear momentum
Elastic collision
Inelastic collision
Hard
Resiliency
Perfectly elastic
Perfectly inelastic
Recoil velocity
Relativity
Special theory of relativity
Absolute velocity
Clock
Gear
Rotation
Revolution
Characteristics
Input shaft

كمية التحرك
ضغط
غاز مثالي
قانون بقاء كمية التحرك
دفع
صاروخ
تصادم . اصطدام
دفع . دفعة
كتلة السكون
جسيم
نظام . مجموعة
نظام معزول
كمية التحرك الخطي
تصادم مرن
تصادم غير مرن
صلد
رجوعية
تام المرونة
تام اللامرونة . — غير مرن تماما
سرعة الارتداد
النسبية
النظرية النسبية الخاصة
سرعة مطلقة
ساعة كبيرة
ترس ، مسننة
دوران
دورة
خصائص ، مميزات
عمود الدخول

Input end	طرف الدخـل
Input force	قوة الدخـل
Input work	شغل الدخـل
Input rope	حبل الدخـل
Output shaft	عمود الخرج
Output end	طرف الخرج
Output force	قوة الخرج
Output work	شغل الخرج
Output rope	حبل الخرج
Black-box machine	مكنة الصندوق الأسود
Driving agent	العامل الحافـز (المحرك)
Driving force	القوة الحافـزة (أو الدافعة)
Point of application	نقطة العمل أو التسليط (لقوة موجهة)
Efficiency	كفاية
Mechanical advantage	الفائدة الميكانيكية
Ideal mechanical advantage	الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA)
Actual (or true) mechanical advantage	الفائدة الميكانيكية الفعلية (أو الحقيقية) (IMA)
Weight-lifting advantage	فائدة رفع الشغل
Inner workings	اشغال داخلية
Time dilation	تمدد الزمن
Relativistic factor	المعامل النسبي
Relativistic effect	تأثير نسبي
Ballistic pendulum	بندول قذف
Impact	تصادم . دفع
Jet propulsion	دفع نفثي
Rocket propulsion	دفع صاروخي
Jet airplane	طائرة نفاثة
Jet engine	محرك نفاث
Jet	منفث
Repeating gun	بندقية تكرارية
Interaction	فعل متبادل
Atmosphere	جو . محيط جوى
Container	وعاء
Real gas	غاز حقيقى
Ideal gas law	قانون الغاز المثالى
Standard atmospheric pressure	الضغط الجوى العيارى
Standard temperature	درجة الحرارة العيارية

Translational motion
Car bumper
Cushioning device
Ballistocardiograph
Wrench

حركة انتقالية
مصادم السيارة
جهاز تخميد الصدمة
رسم القلب القذفي
مفتاح ربط

الفصل السابع

Angular motion
Centripital force
Circular path
Rotational motion
Weightlessness
Angular distance
Angular velocity
Average angular velocity
Instantaneous angular velocity
Angular speed
Degree
Revolution
Radian
Radian measure
Arc
Arc length
Radius
Turn
Angular acceleration
Average angular acceleration
Instantaneous angular acceleration
Rotational velocity
Angular motion equations
Tangential quantity
Tangential distance
Tangential speed
Tangential velocity
Tangential acceleration
Linear acceleration

الحركة الزاوية
القوة الجاذبة المركزية
مسار دائري
حركة دورانية
انعدام الوزن
المسافة الزاوية
السرعة الزاوية
متوسط السرعة الزاوية
السرعة الزاوية اللحظية
السرعة الزاوية
درجة
دورة
زاوية نصف قطرية (أو نقية)
المقياس النصف قطري (أو النقي)
قوس
طول القوس
نصف قطر
لفة
التسارع الزاوي
متوسط التسارع الزاوي
التسارع الزاوي اللحظي
سرعة دورانية
معادلات الحركة الزاوية
كمية مماسية
مسافة مماسية
معدل الحركة المماسية (أو السرعة المماسية)
سرعة مماسية
تسارع مماسي
تسارع خطي

Radial quantity

كمية نصف قطرية (أو إشعاعية)

Radial force

قوة نصف قطرية (أو إشعاعية)

Radial acceleration

تسارع نصف قطري (أو إشعاعي)

Centripital acceleration

تسارع الجذب المركزي

Centrifugal force

القوة الطاردة المركزية

Centrifugal acceleration

تسارع الطرد المركزي

Bisector

منصف (زوايا أو ضلوع)

Dashboard

لوحة أجهزة القياس

Apparent weight

الوزن الظاهري

Actual weight

الوزن الفعلي (أو الحقيقي)

Cyclone

اعصار - زوبعة

Dust remover

مزيل الغبار

Spin-dry cycle

دورة التجفيف دوامة - دورة تجفيف مغزلية

Steep dive

انقضاض حاد

Pullout

الاعتدال من الانقضاض

Phonograph

حاكي (فونوغراف)

Turntable

قرص دوار

Space station

محطة فضائية

Space capsule

كبسولة فضائية

Gear wheel

عجلة مسننة

Ferris wheel

عجلة فريس

Bohr model

نموذج بوهر

الفصل الثامن

Rigid body

جسم جاسئ

Spinning

تدويم . دوران

Angular momentum

كمية التحرك الزاوي

Rotational kinetic energy

طاقة الحركة الدورانية

Center of gravity

مركز الثقل

Center of mass

مركز الكتلة

Point mass

كتلة نقطية

Pivot

محور ارتكاز . مرتكز

Extended body

جسم ممتد

Plumb line

خط رأسي . مطمار

Torque

عزم الدوران

Rotational equilibrium

توازن دوراني

Pivot point

نقطة الدوران

Seesaw	أرجوحة . تأرجح
Lever	رافعة
Lever arm	ذراع الرافعة
Line of force	خط القوة
Moment	عزم
Translational momentum	كمية التحرك الانتقالي
Moment of force	عزم القوة
Moment arm	ذراع العزم
Plank	لوح خشبي ثخين
Compressional force	قوة تضاغطية
Stable equilibrium	توازن مستقر
Neutral equilibrium	توازن متعادل
Unstable equilibrium	توازن غير مستقر
Static equilibrium	توازن استاتي
Inertia	القصور الذاتي
Moment of inertia	عزم القصور الذاتي
Rotational inertia	عزم القصور الدوراني
Fan blade	ريشة المروحة
Flywheel	حدافة
Gyration	تدويم . دوران
Radius of gyration	نصف قطر الحركة التدويمية
Hoop	طوق . طارة
Kinetic energy of rotation	طاقة الحركة الدورانية
Conservation of angular momentum	بقاء كمية التحرك الزاوي
Stabilized gyroscope	جيروسكوب موازن
Summer solstice	الانقلاب الصيفي
Winter solstice	الانقلاب الشتوي
Vernal (Spring) equinox	الاعتدال الربيعي
Autumual equinox	الاعتدال الخريفي
Aphelion	نقطة الرأس (الأبعد من الشمس في مدار كوكب سيار)
Perihelion	نقطة الخضيض (الأقرب من الشمس في مدار كوكب سيار)
Ellepse	قطع ناقص
Spool	مكب . ملف خيط
Parallel-axis theorem	نظرية المحاور المتعامدة

الفصل التاسع

Mechanical properties of matter

الخواص الميكانيكية للمادة

Static property

خاصية استاتيكية

Dynamic property

خاصية ديناميكية

State

حالة

Fluid

مائع . سائل (أحيانا)

Aggregate

مجموعة

Solid

جامد . مادة صلبة

Viscous

لزج

Molasses

دبس السكر (عسل أسود)

Plastic

لدن . بلاستيك

Crystal

بلورة

Crystalline solid

جامد بلوري (متبلور)

Glassy solid

جامد زجاجي

Crystal lattice

شبكة بلورية

Structure

بنية (البلورات)

Brittle

قصف

Supercooled liquid

سائل مفرط التبريد

Amorphous

غير متبلور

Polyethelene

بوليثيلين

Specific gravity

الوزن النوعي . الثقل النوعي

Density

كثافة

Mass density

كثافة كتلية

Weight density

كثافة وزنية

Vibrate

يهتز

Relative density

الكثافة النسبية

Hooke's law

قانون هوك

Deformability

قابلية التشوه

Deformation

تشوه

Load

حمل

Elastic range

مدى المرونة

Elastic limit

حد المرونة

Yield point

نقطة الخضوع

Tensile force

قوة الشد

Stress

إجهاد

Strain

انفعال

Tensile strain

انفعال الشد

Cross-sectional area	مساحة المقطع
Elongation	استطالة
Modulus	معامل . معاير
Shear modulus	معامل القص (معامل الجسوءة)
Bulk modulus	معامل الحجم
Young's modulus	معامل يونج
Compliance	مطاوعة - استجابة
Shear compliance	مطاوعة القص
Tensile compliance	مطاوعة الشد
Hardness	صلادة
Rigidity	جسوءة . جساءة
Bending	انحناء
Compressibility	انضغاطية
Bulk compressibility	الانضغاطية الحجمية
Pascal's principle	قاعدة باسكال
Archimede's principle	قاعدة ارشميدس
Buoyant force	قوة الطفو
Buoyancy principle	قاعدة الطفو
Hydraulic press	مكبس ايدرولى
Calipers	عدة قياس بفكين
Volumetric flask	قاروره حجمية
Barometer	بارومتر (مقياس الضغط)
Barometric pressure	ضغط بارومتري
Boiling point	نقطة أو درجة الغليان
Vacuum pump	مضخة تفريغ
Manometer	مانومتر
Flow	انسياب . دفق . تدفق جريان
Laminar flow	انسياب طبقي . تدفق . صفحي
Simple flow	انسياب بسيط
Turbulant flow	تدفق مضطرب . دفق دوامى
Pipe	ماسورة . أنبوبة (أحيانا)
Stream line	خط انسيابى
Flow velocity	سرعة الانسياب . سرعة الدفق
Flow line	خط انسيابى
Flow rate	معدل الدفق
Poise	بواز (وحدة اللزوجة)
Poiseuille's law	قانون بوازيل

Velocity profile	جانبية السرعات
Profile	جانبية
Viscosity	لزوجة
Viscous force	قوة اللزوجة
Driving pressure	ضغط دافع
Centipoise	سنتيپوز (وحدة اللزوجة)
Viscometer	مقياس اللزوجة
Capillary	شعري . أنبوبة شعرية
Capillary tube	أنبوبة شعرية
Capillary Viscometer	مقياس لزوجة شعري
Bernoulli's equation	معادلة برنولي
Incompressible	غير قابل للانضغاط . لا ينضغط
Viscous friction	احتكاك اللزوجة
Torricelli's theorem	نظرية توريشيلي
Spigot	ذيل الماسورة
Efflux	تدفق . انبجاس
Efflux speed	سرعة الانبجاس
Aspirator	سافط أو سفاط (لسحب الغاز)
Atomizer	مزداد . مدرة
Blood pressure	ضغط الدم
Squeeze bulb	بضيلة الكبس (الضغط)
Release valve	صمام التصريف
Stethoscope	سماعة الطبيب . مسماع
Systolic pressure	الضغط الانقباضي
Diastolic pressure	الضغط الانسيابي
Pressure peak	ذروة الضغط
Glass fiber	ألياف زجاجية
Fiber glass	الزجاج الليفى
Collagen fibers	ألياف الكولاجين
Tensile strength	مقاومة الشد
Blood plasma	بلازما الدم
Syphon	سيفون
Pycnometer	بكنومتر (مقياس الثقل النوعى)
Stoplight	مصباح إشارات المرور
Vacuum chamber	غرفة تفريغ
Stamping machine	مكنة تشغيل بالكبس
Stokes' law	قانون ستوكس

Reynolds number

Sedimentation speed

Hypodermic needle

عدد رينولدز

سرعة الترسيب

إبرة تحت جلدية (للحقن تحت الجلد)

الفصل العاشر

Thermal properties of matter

Caloric

Chip

Drill

Thermometer

Freezing point

Boiling point

Scale of temperature

Temperature scale

Celsius scale

Centigrade scale

Fahrenheit scale

Kelvin scale

Celsius degree

Fahrenheit degree

Kelvin degree

Thermistor

Response time

Electrical resistance

Intercept

Absolute temperature

Absolute temperature scale

Liquifaction

Mole

Avogadro's number

Atomic mass

Atomic weight

Molecular mass

Molecular weight

Kilogram-mole (kg mol)

الخواص الحرارية للمادة

كالوريك . السيل الحراري

نحاته . شظية

مثقاب

ترمومتر

نقطة التجمد . درجة التجمد

نقطة الغليان . درجة الغليان

مقياس درجات الحرارة

مقياس درجات الحرارة

مقياس « سلسيوس »

مقياس مئوي لدرجات الحرارة

مقياس « فهرنهايت »

مقياس « كلفن »

درجة سلسيوس . درجة مئوية

درجة فهرنهايتية ، درجة فهرنهايت

درجة كلفن

ترمستور

زمن الاستجابة

مقاومة كهربائية

الجزء المحصور

درجة الحرارة المطلقة

المقياس المطلق لدرجات الحرارة

إسالة

جزء جرامى . جزء . مول

عدد أفوجادرو

كتلة ذرية

وزن ذرى

كتلة جزيئية

وزن جزيئى

جزء كيلوجرامى

Gas-law constant	ثابت قانون الغاز
Boltzmann's constant	ثابت بولتزمان
Absolute zero	الصفر المطلق
Superfluidity	فوق السيولة . فرط السيولة
Super conductivity	فوق الموصلية
Triple point	النقطة الثلاثية
Gas thermometer	الترمومى الغازى
Pressure guage	مقياس الضغط
Guage pressure	ضغط المقياس
Liter	لتر
Molecular velocity	السرعة الجزيئية
Probability	احتمال
Maxwell's theory	نظرية ماكسويل
Kinetic theory of gases	النظرية الحركية للغازات
Colloidal particles	دقائق غروانية (أو شبه غروية)
Monatomic	أحادى الذرة
Photoelectric effect	التأثير الكهربائى الضوئى
Partial pressure	ضغط جزئى
Dalton's law of partial pressures	قانون دالتون للضغوط الجزئية
Osmotic pressure	الضغط الأوزموزى
Osmometer	أوزمومتر . مقياس الضغط الأوزموزى
Semipermeable memberane	غشاء شبه منفذ
Solute	مذاب
Solvent	مذيب
Solution	محلول
Mixture	مخلوط . خليط
Memberane	غشاء
Albumin	زلال
Dryice	ثلج جاف
Surroundings	محيطات . جو محيط
Thermal equilibrium	توازن حرارى
Nutritionist calorie	سعر الغذوى
Heat capacity	سعة حرارية
Specific heat capacity	السعة الحرارية النوعية
Cooling	تبريد
Phase change	تغير الطور
Crystalline phase	الطور البلورى

Liquid phase	طور السائلة . الطور السائل
Gas phase	طور الغاز
Vapor phase	طور البخار . الطور البخارى
Heat of vaporization	حرارة التبخير
Evaporation	تبخر . بخر
Heat of evaporation	حرارة التبخر
Vaporization	تبخير .
Vapor pressure	ضغط البخار
Torr	تور : وحدة ضغط تعادل ضغط مليمتر واحد من الزئبق
Saturated vapor	بخار مشبع
Heat of fusion	حرارة الانصهار
Fusion	انصهار . صهر
Melting point	نقطة الانصهار
Superheat	احمى . حمص فائق الحرارة
Melting	انصهار . صهر
Crystallinity	درجة التبلور
Calorimetry	قياس كمية الحرارة (الكالوريمترية)
Calorimeter	مسعر : كالوريمتر
Metabolism	أيض
Thermal expansion	تمدد حرارى
Lengthening pipe	ماسورة تطويل
Heating system	نظام تدفئة
Linear thermal expansion coefficient	معامل التمدد الطول الحرارى
Thermal volume expansion coefficient	معامل التمدد الحرارى الحجمى
Gallon	جالون
Transfer of heat	انتقال الحرارة
Conduction	توصيل
Heat conduction	توصيل حرارى
Heat transfer	انتقال الحرارة
Heat transmission	نقل أو ارسال الحرارة
Heat conductivity	الموصلية الحرارية
Molecular collision	تصادم جزيئى
Conductor	موصل
electrical conductor	موصل كهربائى
Heat conductor	موصل حرارى
Valence electron	الكثرون التكافؤ
Convection	حمل

Heat convection	حمل حرارى
Register	جهاز تحكم فى دخول الهواء (أو خروجه) مسجل - مكتبة تسجيل
Convective current	تيار الحمل
Gulf stream	تيار الخليج
Radiation	اشعاع
Heat radiation	اشعاع حرارى
Ether	اثير
Luminiferous ether	اثير وضاء (ناقل للضوء)
Newton's law of cooling	قانون نيوتن للتبريد
Stefan's law	قانون ستيفان
Black body	جسم أسود
Reflectivity	انعكاسية
Absorber	ماص . ممتص
Radiator	مشع
Humidity	رطوبة
Water content	المحتوى المائى
Supersaturated vapor	بخار فوق مشبع
Dew	ندى
Dew point	نقطة الندى
Weather bureau	مكتب الاحوال الجوية
Meteorologist	ارصادى . خبير ارصاد جوية
Wet-bulb thermometer	الترمومتر ذو البصيلة المخضلة
Dry-bulb	الترمومتر ذو البصيلة الجافة
Specific heat	الحرارة النوعية
Dichloro ethane	ثنائى كلوريد الايثان
Water equivalent	المكافئ المائى
Shrink fit	توافق انكماش
Heat-resistant glass	زجاج مقاوم للحرارة
Dehumidifier	مزيل الرطوبة . مجفف الهواء

الفصل الحادى عشر

Diatomic	ثنائى الذرة
Chemical bond	رابطة كيميائية
Internal energy	طاقة داخلية
Heat flow	سريان الحرارة

Total energy	طاقة كلية
Vibrational energy	طاقة اهتزازية
Statistical mechanics	الميكانيكا الاحصائية
Heat energy	طاقة حرارية
Heat gain	كسب حرارى
Heat loss	فقد حرارى
British thermal unit (Btu)	الوحدة الحرارية البريطانية (و . ح . ب)
Caloric	سعر . كالورى .
Quantity of heat	كمية الحرارة
Large caloric	سعر كبير
Kilo calorie	كيلو كالورى .

الفصل الثانى عشر

Sound	صوت
Compressional disturbance	اضطراب تضاغطى
Eardrum	طبلة الأذن
Material vibration	اهتزاز مادي
Transmitting medium	وسط ناقل
Sound box	صندوق مصوت
Firecracker	سهم نارى مفرق
Sound wave	موجة صوتية
Rarification	تخلخل
Diaphragm	غشاء
Loudspeaker	مكبر الصوت
Pressure wave	موجة ضغطية
Wave-front	جبهة الموجة
Speed of sound	سرعة الصوت
sound intensity	شدة الصوت
Loudness	جهارة
Sound intensity scale	مقياس شدة الصوت
Decibel	ديسيبل
Decibel scale	مقياس الديسيبل
Bel	بل

Thermodynamics	الديناميكا الحرارية
Thermodynamic	دينامي حرارى
Gross property	خاصية اجمالية
State variable	متغير الحالة
System	نظام
Entropy	انتروپيا
Macroscopic	ماكروسكوبى
Work content	محتوى الشغل
Heat content	المحتوى الحرارى
Mechanical action	فعل ميكانيكى
Balance-sheet	ميزانية - كشف ميزانية
First law of thermodynamics	القانون الأول للديناميكا الحرارية
Expansion work	شغل التمدد
P-V diagram	رسم بياني P-V
P-V curve	منحنى P-V
Isothermal	ايسوثرمى . متساوى درجة الحرارة
Isothermal process	عملية ايسوثرمية
Isothermal change	تغير ايسوثرمى
Isothermal compression	انضغاط ثابت درجة الحرارة (ايسوثرمى)
Heat reservoir	خزان حرارى . مستودع حرارى
Reversible	انعكاسى
Reversible process	عملية انعكاسية
Adiabatic	ادياپاتى
Adiabatic compression	انضغاط ادياباتى
Adiabatic process	عملية ادياباتية
Adiabatic change	تغير ادياباتى
Adiabatic work	شغل ادياباتى
Diesel engine	محرك ديزل
Throttling process	عملية تخفيف الضغط بالخنق
Cycle	دورة
Thermodynamic cycle	دورة دينامو حرارية
Cyclic process	عملية دورية
Process	عملية
Efficiency	كفاءة - كفاءة
Refrigerator	مبرد

Work output	خرج الشغل
Energy input	دخل الطاقة
Otto cycle	دورة أوتو
Engine efficiency	كفاءة المحرك (أو الآلة)
Internal combustion	احتراق داخلي
Internal combustion engine	محرك احتراق داخلي
Exhaust	عادم . تصريف
Exhaust energy	طاقة العادم
Steam engine	محرك بخارى
Steam turbine	تربين بخارى
Gasoline engine	محرك جازلينى (نيزمين)
Diesel engine	محرك ديزل
Highest possible efficiency	أعلى كفاءة ممكنة
Carnot cycle	دورة كارنو
Carnot engine	محرك كارنو
Maximum efficiency	الكفاءة القصوى
Steam boiler	غلاية البخار
Ambient temperature	درجة الحرارة المحيطة
Heat pump	مضخة حرارية - مكنة تبريد
Refrigeration	تبريد
Refrigeration system	جهاز تبريد
Compressor	ضاغط
Coil	مجموعة أنابيب متصلة
Throttling valve	صمام خائق
Cooling compartment	صندوق التبريد
Air-conditioning unit	وحدة تبريد الهواء
Running time	زمن الدوران (أو التشغيل)
Refrigeration unit	وحدة تبريد
Ton of refrigeration	طن تبريد
Second law of thermodynamics	القانون الثانى للديناميكا الحرارية
Event	حدث
Spontaneous event	حدث تلقائى
Odds	ارجحية - خلاف
Order	نظام
Disorder	فوضى (خلل النظام)
Combination	توافقية
Percentage deviation	الانحراف المئوى

Thermal motion
Entropy change
Isolated system
Radiant energy
Raddle wheel
Heat of combustion
Nuclear power plant

حركة حرارية
تغير الانتروبيا
نظام معزول
طاقة إشعاعية (أو مشعة)
عجلة تغديف
حرارة الاحتراق
وحدة خيوية لتوليد القدرة

الفصل الثالث عشر

Wave motion
Vibrating system
Restoring force
Amplitude of vibration
Period
Period of vibration
Frequency of vibration
Hertz (Hz)
Pendulum
Oscillation
Vibration
Cycle per second (cps)
Simple harmonic motion
Spring constant
Reference circle
Sinusoidal vibration
Sinusoidal curve
Sinusoidal motion
Simple pendulum
Bob
Forced vibration
Damped
Damping
Damped system
Overdamped
Underdamped
Critical damping
Critically damped system

حركة موجية
نظام يهتز
قوة الاستعادة
سعة الاهتزاز
الزمن الدوري
زمن الاهتزاز
تردد الاهتزاز
هرتز
بندول
ذبذبة
اهتزاز
دورة في الثانية
الحركة التوافقية البسيطة
ثابت الزنبرك
دائرة الاسناد
اهتزاز جيبى
منحنى جيبى
حركة جيبية
زمن الخطران (أو الارتجاج)
ثقل البندول
اهتزاز قسرى
متضائل
مضائلة
نظام متضائل
زائد المضائلة
ناقص المضائلة
مضائلة جرجة
نظام حرج المضائلة

Free vibration

Driven system

Natural frequency

Resonance

Resonance frequency

Resonance vibration

Driven vibration

Ball bearing

Natural period

Suspension system

Connecting rod

اهتزاز طليق (أو حر)

نظام مقود

التردد الطبيعي

رنين

تردد الرنين

اهتزاز الرنين

اهتزاز مقود

محمل كريات

الزمن الدوري الطبيعي

نظام تعليق

ذراع توصيل

الفصل الرابع عشر

antenna

Transverse wave

Spring steel

Propagation

Crest

Trough

Overlap

Principle of superposition

Superposition principle

Incident wave

Reflected wave

Standing wave

In-phase

Out of phase

Resonance motion

Tuning fork

Quantized

Resonant wave-length

Mode

Resonant mode

Mode of vibration

Nodal line

هوائي

موجة مستعرضة

صلب الزنبركات

انتشار

قمة

وادي

تراكب

مبدأ التراكب

مبدأ التراكب

موجة ساقطة

موجة منعكسة

موجة مستقرة (أو واقفة)

متفق الطور .

متفاوت الطور .

حركة رنينية

شوكة رنانة

مكواة (موجودة بشكل مضاعفات لكم ثابت)

الطول الموجي الرنيني

نمط

نمط رنيني

نمط الاهتزاز

نمط عقدي

Nodal point	نقطة عقدية
Node	عقدة
Antinode	بطن (الموجة)

الفصل الخامس عشر

Longudinal wave	موجة طولية
Compressional wave	موجة تضاغطية
Loop	حلقة
Fundamental frequency	التردد الاساسى
Coil spring	زنبرك ملتف
Sound level	مستوى (شدة) الصوت
Intensity level	مستوى شدة الصوت
Jackhammer	ثقابة الصخور
Riveter	مكنة برشمة
Loudness level	مستوى الجهازة
Frequency response	الاستجابة الترددية
Ultrasonic waves	امواج فوق سمعية
Audible sound	صوت مسموع
Quality of sound	نوع الصوت
Pitch of sound	درجة الصوت
Tone	نغمة
Tone-deaf	اضم للطبقات الصوتية
Sine-wave voltage	فلطية جيبيية
Threshold of hearing	عتبة السمع
Threshold of pain	عتبة الالم
Harmonic	توافقية
Fundamental harmonic	توافقية أساسية
Overtone	نغمة توافقية
Interference	تداخل
Receiver	مستقبل
Path length	طول المسار
Phase	طور
Constructive interference	تداخل بناء
Destructive interference	تداخل اتلافي (هدام)
Phase difference	ق الطور

Beats

Organ pipe

Kundt's tube

Air column

Musical scale

Major musical scale

Harmonic combination

Musical interval

Octave

Doppler effect

Doppler shift

Frequency shift

Shock wave

Sonic boom

Mach

Mach number

Reverbration time

Sonar

Radar

الضربات

أنبوبة الأرغن

أنبوبة كوندت

عمود هوائى

سلم موسيقى

السلم الموسيقى الكبير

تركيبة توافقية (أوهارمونية)

مسافة موسيقية

جواب (النغمة)

ظاهرة دوبلر

زحزحة دوبلر

زحزحة التردد

موجة صدمية

دوى اختراق جدار الصوت

ماخ

العدد الماخى

زمن التردد

سونار

رادار

الفصل السادس عشر

Electron

Volence electron

Charging by conduction

Charging by induction

Grounded

Coulomb's law

Electric field

Positive test charge

Electric lines of force

Electrostatic

Electric field

Capacitor condenser

Equipotential line

Equipotential plane

Absolute potential

الكترون

الكترون تكافؤ

الشحن بالتوصيل

الشحن بالحث

مؤرض (متصل بالأرض)

قانون كولوم

مجال كهربائى

شحنة اختبار موجبة

خطوط القوة الكهربائية

الالكتروستاتى

شدة المجال الكهربائى

مكثف

خط متساوى الجهد

مستوى متساوى الجهد

الجهد المطلق

الفصل السابع عشر

Electromotive force (emf)

القوة الدافعة الكهربائية (ق . د . ك)

Electron gun

مدفع الكتروني

Electron-volt

الالكترون - فولت

Current

التيار

Ampere

امبير

Resistor

مقاوم

Resistance

مقاومة

Ohm's law

قانون أوم

In series

على التوالي

Potential drop

هبوط الجهد

Resistivity

المقاومية

Conductivity

الموصلية

Supperconductor

مفرط الموصلية

Capacitance

السعة

Permittivity

المجاورة

Dielectric

عزل

Dielectric constant

ثابت العزل

Relative permittivity

المجاورة النسبية

Dipolar molecules

جزيئات ثنائية الاستقطاب

Dipole moment

عزم ثنائي الاستقطاب

الفصل الثامن عشر

Kirchoff's point rule

قاعدة النقطة لكيرتشوف

Kirchoff's loop rule

قاعدة العروة لكيرتشوف

Potential divider

مجزئ الجهد

Electroencephalograph

جهاز رسم المخ

Standard battery

بطارية قياسية

Terminal potential

جهد طرفي

الفصل التاسع عشر

North pole

قطب شمالي

Right-hand rule

قاعدة اليد اليمنى

Intensity

شدة

Flux density
Magnetic induction
Magnetic field strength
Flux
Permeability
Ampère circuital law
Solenoid
Toroid
Pole piece
Ferromagnetic atoms
Spin
Curie temperature
Domain
Electromagnet
Magnetic permeability
Saturated
Hysteresis loop
Retentivity
Coercive force

كثافة التدفق
الحث المغناطيسي
شدة المجال المغناطيسي
التدفق
الانفاذية
قانون أمبير للدوائر
ملف لولبي
ملف حلقي
خرافة القطب
ذرات ذات مغناطيسية حديدية
تدويم
درجة حرارة كوري
منطقة (مغناطيسية)
مغناطيس كهربي
الانفاذية المغناطيسية
مشبع
انشطة التخلفية
محتفظية
قوة مغناطيسية فهيرية

الفصل العشرون

Inductance
Induced current
Shunt
Magnetic moment
Primary coil
Secondary coil
Induced e.m.f.
Lenz's law
Faraday's law
Mutual inductance
Inductor
Contact
a.c. Generator
Slip ring
Brush contact
Armature

محاثة
التيار المستحث
مقاومة مجزء التيار
العزم المغناطيسي
الملف الابتدائي
الملف الثانوي
ق. د. ك. المنتجة بالحث
قانون « لنز »
قانون « فاراداي »
محاثة متبادلة
ملف محاثة
ملاصقي
مولد التيار المتردد
حلقة انزلاق
تلامس فرجوني
عضو الانتاج

Counter e.m.f.
Overloaded
Knife switch
Eddy current
Magnetic damping

ق. د. ك. المضادة
حمل فوق طاقته
مفتاح سكينى
تيار دوامى
مضائلة مغناطيسية

الفصل الواحد والعشرون

Reactive circuit
Exponential decay
Time constant
Bleeder resistance
Electroplating
Root mean square (rms) cu
Peak current
Capacitive
Reactance
Out of phase
Inductive reactance
Impedance
Power factor
resonance frequency
Oscillator
resonant circuit
Yoke
Driving voltage
Step up transformer
Step down transformer
Filter
Output voltage
Input
Wave form
Effective value
Average value
In-phase
Leading current

دائرة مفاعلة
اضمحلال أسي
الثابت الزمنى
مقاومة تجزئية
الطلاء بالكهرباء
جذر متوسط مربع التيار
قيمة الذروة للتيار
سوى
مفاعلة
متفاوت الطور
المفاعلة الحثية
المعاوقة
عامل القدرة
تردد الرنين
مذبذب
دائرة رنانة
مقرن
الجهد الحافز
محول رفع
محول خفض
مرشح
جهد الخرج
دخل
الشكل الموجى
القيمة الفعالة
القيمة المتوسطة
متطور
تيار متقدم

الفصل الثاني والعشرون

Thermionic emission

الانبعاث الترميوني

Solid state devices

نبيطات الحالة الصلبة

Electron gas

غاز الكتروني

Work-function

دالة الشغل

Diode

صمام ثنائي

Cathode

مهبط

Filament

فتيلة

Covalent bond

ترابط اسهامي

Lattice

شبيكة

n-type semi-conductor

شبه موصل سالب النوع

Vacancy

ثغرة

Hole

فجوة

P-type semi-conductor

شبه موصل موجب النوع

Steady current

تيار مطرد

Drain

نرح

Amplifier

مضخم

Half wave rectifier

مقوم نصف موجي

Ripple

تموج

Transmitting antenna

هوائي الإرسال

Carrier frequency

تردد الموجة الحاملة

Loop antenna

هوائي اطاري

Tuning

موائفة

Modulated

مضنبنة

Microphone

ميكروفون

Frame of reference

مناط إسناد

Diathermy

العلاج بالإنفاذ الحراري

الفصل الثالث والعشرون

Corpuscle

جسيم

Emission

طيف الانبعاث

Spectroscopy

علم الطيف

Refractive index

معامل الانكسار

Crown glass

زجاج تاجي

Flint glass

زجاج ظراني أو صواني

Wave-front	صدر الموجة
Absolute index of refraction	معامل الانكسار المطلق
Relative index of refraction	معامل الانكسار النسبي
Snell's law	قانون « سنل »
Interface	سطح بينى
Light pipe	أنبوبة ضوئية
Focal length	البعد البؤرى
Virtual (or imaginary) image	صورة تقديرية
Concave shpherical mirror	مرآة كروية مقعرة
Convex shpherical mirror	مرآة كروية محدبة
Principal axis	المحور الرئيسى
Focus	بؤرة
Focal point	النقطة البؤرية
Parabolic mirror	مرآة مكافئة المقطع
Real image	صورة حقيقية
Specular reflection	انعكاس مرآوى
Diffuse reflection	انعكاس انتشارى

الفصل الرابع والعشرون

Retina	الشبكية
Cornea	القرنية
Iris diaphragm	حاجب الحدقة القرنية
Pupil	إنسان العين
Nearsighted or myopic	حسبر أو قصر النظر
Far point	النقطة البعيدة
Near point	النقطة القريبة
Farsighted or hyperopic	طويل النظر
Accomodation	التكيف
Bifocal	ثنائى البؤرة
Astigmatism	لا استجمى
Blur	تشويش
Spherical aberration	الزيع الكروى
Chromatic aberration	الزيع اللولى
Achromatic lens	عدسة لالوتية
Angle subtended	الزاوية المقابلة
Magnifying power	قوة التكبير
Objective lens	العدسة الشيئية

Barrel (microscope)	قصبة
Eyepiece lens	العدسة العينية
Telescope	تلسكوب (مقراب)
Microscope	ميكروسكوب (مجهر)
Field lens	عدسة المجال
Spy glass	نظارة مقربة
Prism binocular	منظار ثنائى العينية منشورى
Spectroscope	سبكروسكوب (مطياف)
angle of deviation	زاوية الانحراف
radioastronomy	علم الفلك الاشعاعى
Wire mesh	شبيكية السلك
Collimating lens	عدسة التسديد
Monochromatic	ا-نادرى اللون
Polarized light	ضوء مستقطب

الفصل الخامس والعشرون

Diffuse fringe	هدبة منتشرة
Diffraction grating	محزوز الحيود
Interferometer	مقياس التداخل
Michelson's interferometer	مقياس التداخل لمايكلسون
Semitransparent mirror	مرآة شبه شفافة
Refractive index	معامل الانكسار
Index of refraction	معامل الانكسار
Film	غشاء
Optical path length	طول المسار الضوئى
Equivalent optical path length	طول المسار الضوئى المكافئ
Newton's rings	حلقات نيوتن
Grating spectrometer	مطياف ذو محزوز حيود
Collimator	الميزاء
Cross hairs	شعيرات متعامدة أو متصالبة
High-order maximum	النهاية العظمى ذات الرتب العليا
Grating equation	معادلة المحزوز
Grating spacing	تباعد المحزوز
Bright-line spectrum	الطيف الخطى الساطع
Incandescent bulb	مصباح متوهج

Continuous spectrum	طيف مستمر
Single slit	شق احادى
Exposure time	زمن التمرّض
Limit	حد
Resolving power	قدرة التحليل
Resolution	تحليل
Optical device	وسيلة أو جهاز بصرى
Physical optics	بصريّات فيزيائية
Washer	فلكة (وردة)
Bragg equation	معادلة براج
Interference	تداخل
Diffraction	حيود
Coherence (Coherency)	تماسك (ترابط)
Coherent	متماسك (مترابط)
Constructive interference	تداخل بناء
Destructive interference	تداخل اتلافي
In phase	متفق الطور
Out of pahse	متفاوت الطور
Crest	قمة
Trough	قرار
Wave length	الطول الموجى
Phase difference	فرق الطور
Path difference	فرق المسار
Plane wave	موجة مستوية
Slit	شق - جذة
Phase	طور
Path	مسار
Amplitude	سعة (اتساع)
Antinode	بطن الموجة
Node	عقدة
Young's double slit-experiment	تجربة الشق المزدوج ليونج
Interference of light	تداخل ضوئى
Bright	ساطع
Brightness	سطوع
Fringe	هدبة
Sodium arc	قوس صوديومى
Interference pattern	نمط التداخل

Interference band	شريط التداخل
Photographic plate	لوح فوتوغرافي
Order	رتبة
Fringe spacing	تباعده الهداب
Bragg reflection	انعكاس براج
Rock salt	الملح الصخري
Polycrystalline	متعدد البلورات
Laue diffraction	تداخل لاو
Debye-scherrer diffraction	تداخل ديبي - شيرر
Loudspeaker	مجهر (مكبر الصوت)
Oscillator	مذبذب
Coated lens	عدسة مغلفة
Prism	منشور
Hue	النقبة
Magenta	ماجنتا (لون أحمر مزرق)
Screw	لولب . قلاووظ
Screw pitch	خطوة اللولب
Lucite	لوسيت
Angular separation	انفصال زاوي
Reflection grating	محزوز عاكس
Transmission grating	محزوز منقلد

الفصل السادس والعشرون

Black body	جسم أسود
Planck's constant	ثابت بلانك
Photoelectric effect	التأثير الكهروضوئي
Photocell	خلية كهروضوئية
Photoelectric threshold wave length	الطول الموجي الكهروضوئي المشرف
Stopping potential	جهد إيقاف
Quantized energy	طاقة مكمأة
Quantum	كم
Photon	فوتون
Photoelectric equation	المعادلة الكهروضوئية
Scattering	استطارة
Scattered light	ضوء مستطير

Milky way	التيابنة
reference frame	إسناد
Inertial reference frame	إسناد قصوري
Reductio ad absurdum	الخطأ
Time dilation	لزمان
Twin paradox	في الظاهري للتوائم
Rest mass	لسكون
Pair production	زوجي
De broglie wavelength	ي برولي الموجي
Heisenberg uncertainty principle	عدم اليقين لها ينزبرج
Probe particle	المجس
Quantum mechanics	كما الكم
Wave mechanics	كما الموجية
Pattern	
Schrodinger equation	شرودنجر
Quantized	

الفصل السابع والعشرون

Thompson model.	طومسون
Nuclear atom	النوية
Nucleus	
Series limit	لتسلسلة
Balmer series	سلة بالمر
Rydberg constant	رايدبرج
Lyman series	سلة ليمن
Paschen series	سلة باشن
Stable orbit	مستقر
Electron transition	الكتروني
Unexcited	ستثار
Energy level diagram	ياني لمستويات الطاقة
Ground state	الأرضية
Singly ionized	التأين
Ionization energy	التأين
Wave equation	ة الموجية
Wave function	الموجية

Quantum numbers	الأعداد الكمية
Shell	قشرة
Orbital quantum number	العدد الكمي المداري
Spin quantum number	العدد الكمي للتدويم
State	حالة
Pauli exclusion principle	مبدأ باولي للاستبعاد
Characteristic X-rays	أشعة X المميزة
Bremsstrahlung	أشعة الفرملة
Line spectrum	طيف خطي
Continuous spectrum	طيف مستمر
Band spectrum	طيف شريطي
Infrared spectroscopy	دراسة طيف الأشعة تحت الحمراء
Incoherent beam	شعاع غير متماسك
Coherent beams	الأشعة المتماسكة
Laser	الليزر
Metastable state	حالة مؤقتة الاستقرار
Subshell	قشرة فرعية
Bombardment	قذف

الفصل الثامن والعشرون

Atomic mass unit	وحدة الكتلة الذرية
Nucleous	نويات
Atomic mass number	عدد الكتلة الذرية
Mass number	عدد الكتلة
Unified system	النظام الموحد
Mass spectrograph	مطياف الكتلة
Ion source	مصدر أيوني
Relative abundance	الكثرة النسبية
Isotopes	نظير
Mass deficit	الفقد الكتلي
Binding energy	طاقة الترابط
Radioactivity	النشاط الإشعاعي
Radioactive	مشع
Decay constant	ثابت الانحلال
Disintegration	تفتت
Curie	كوري
Parent nucleus	نواة نتوج

Background radiation
Baryon
Nuclear reaction
Transmute
Chain reaction
Fission
Self-sustained
Critical mass
Moderator
Photographic emulsion
Cloud chamber
Bubble chamber
Geiger counter
Santillation counter
Photomultiplier
Rem
Quality factor
Radiation damage
Antiparticle

الخلفية الاشعاعية
باريون
تفاعل نووى
يتحول
تفاعل متسلسل
انشطار
ذاتى المداومة
الكتلة الحرجة
مهدىء (النيوترونات)
مستحلب فوتوغرافى
الغرفة السحابية
غرفة الفقاعات
عداد جيجر
عداد الوميض
مضاعف ضوئى
المكافئ البشرى للراد rad (رم)
معامل الجودة
اتلاف اشعاعى
جسيم مضاد

الفصل التاسع والعشرون

Premordial fireball
Big-bang theory
Galaxy
Red giant
Triple alpha reaction
Wite dwarf
Nova
Supernova
Red shift
Radioactive dating
Radiocarbon dating
Mantle

الشفاب الأولى المتوهج
نظرية الانفجار العظيم
مجرة
العماق الأحمر
تفاعل ألفا الثلاثية
القزم الأبيض
نجم مستعر
نجم متفجر فائق التوهج
الفرجة الحمراء
التأريخ الاشعاعى
تأريخ بالكربون المشع
طبقة مغلقة

الفهرس

«أ»

الأطوال الموجية لدى برولى ٧٥٤
الأطوال الموجية للضوء ٦٣٩
الأعداد الكمية ٧٨٩ ، ٧٩٢
أقطاب المغناطيس ٥١٨
اكتشاف الأشعة السينية (X) ٩٥
الالكترونون ٤٢٨
الالكترونات ٦٠٣
آلة « آتود » ٧٠
آلة التصوير (الكاميرا) ٦٧٧
الأمان الكهربائي ٥٠٥
امتصاص الضوء ٧٨٣
أمواج الجسيمات ٧٥٣
أمواج الرادار ٦١٨
الامواج الكهرمغناطيسية ٦١٣ ، ٦٣١
- توليدها ٦١٣
- طيفها ٦١٩
- سرعتها ٦٢٩
- وعلاقة E مع B ٦١٦ ، ٦٢٩
أمواج اللاسلكى :
- توليدها ٦١٣
- استقبالها ٦١٩
الأميتر ٤٦٧ ، ٥٥٣
الأنابيب الضوئية ٦٤٨
أنبوبة أشعة اكس (X) ٥١٧
أنبوبة « كونت » ٤٢٦
أنتاج زوجى ٧٥٣ ، ٨٥٦
انترويا ٣٤٩
اندماج نووى ٨٣٥
انسياب طبقي ٢٤٥
الانسياب فى المواسير ٢٤٧
الانشطار النووى ٨٣١

الابتعاث الترميوني ٦٠٤
الابتعاث المستثار ٨٠٦
اجهاد ٢٩٩
الأجهزة البصرية ٦٧٣ - ٦٩٣
الأجهزة الميكانيكية الكهربائية ٥١١ - ٥٧٥
الاحتمال والفوضى ٣٤٧
اختيار موضع المحور ١٩٢
الأرض (الكهربائية) ٤٣٢
الأساس الجزيئى لدرجة الحرارة ٢٧٤
استجابة الأذن ٤٠٤
الاستقرار النووى ٨٢١ و ٨٢٩
أشباه الموصلات :
- الثنائى ٦٠٧
- سالبة النوع ٦٠٩
- موجبة النوع ٦١٠
الاشعاع :
- للجسم الأسود ٧٣٠
- التلف الناتج عنه ٨٤٣
- جرعته ٨٤١
- التأثير على البشر ٨٤١ - ٨٤٥
- النووى ٨٣٦
- الحرارى ٣١٤
أشعة اكس (X)
- حيودها ٧٢١
- اكتشافها ٩٥
- انتاجها ٧٩٥
- المميزه ٧٩٦
أشعة جاما ٨٢٥ ، ٨٣٧
أشعة الغملة ٧٩٦
أصل الأرض ٨٦٥

الانصهار ٣٠٣

الانضغاطية ٢٣٢

أنظمة البكرات ١٢٩

انعدام الوزن ١٧٥

انعدام الوزن في المصعد ٦٩

انعكاس الضوء ٦٤١

الانعكاس الكلي الداخلى ٦٤٦

انعكاس مرآوى ٦٧٠

الانعكاس المنتشر (الانتشارى) ٦٧٠

الانفاذية المغناطيسية ٥٤٢

الانفاذية المغناطيسية للفراغ الحر ٥٣٠ ، ٦٣١

الانفعال ٢٢٩

الانكسار ٦٤٣

أنواع التوازن ١٩٩

اهتزاز قسرى ٣٧٠

اهتزاز متضائل ٣٧١

الايديوجين :

مستويات الطاقة له ٧٨١

طيفه ٧٧٢

الدالة الموجية ٧٨٩

الشغل اللازم لتأيينه ٤٤٨

« ب »

بارومتر ٢٤٢

باريون ٨٤٦

بخار فوق مشبع (زائد التشبع) ٣١٦

البروتون ٨١٤

بصريات الألياف ٦٤٨

البطارية ٤٥٦

بطنى الموجة ٣٨٤

البعد البؤرى :

- مرآة مقعرة ٦٥٠

- مرآة محدبة ٦٥٧

- لعدسة ٦٦٠ - ٦٦١

البندول القلبي ١٤٩

البؤرة :

- مرآة مقعرة ٦٥٠

- مرآة محدبة ٦٥٧

- لعدسة ٦٦٠ - ٦٦١

البولارويد ٦٩١

« ت »

التأثير الكهروضوئى ٧٣٣

التأريخ بالكربون المشع ٨٦٥

تبخير ٣٠٠ ، ٣١٦

تجربة « ديفيسون وجرمر » ٧٥٤

تجربة قطرة الزيت ٤٩٧

تحويل الوحدات ٣٢ ، ٨٧٣

تخطيط المجال المغناطيسى ٥١٨

التخلفية المغناطيسية ٥٤٤

التداخل الضوئى ٦٩٩ - ٧٢٣

التداخل فى الشق المزدوج ٧٠٣

التداخل فى غشاء رقيق ٧١٠

تداخل الموجات الضوئية ٤٠٨

التدفق المغناطيسى ٥٢٨

- كثافته ٥٢٢

التدويم ٨٤٦

التردد الأساسى أو الطبيعى للاهتزاز ٣٧١

التردد والزمن الدورى ٣٦٢

الترموترات ٢٦٥

تسارع ٣٤

تسارع الجاذبية ٤٢

تسارع الجذب المركزى ١٧٢

تسارع الحركة التوافقية البسيطة ٣٦٤ - ٣٦٦

التسارع الزاوى ١٦٤

تسارع النقط الذائق ٤٢

تسارع مماسى ١٦٨

التسارع نصف القطرى ١٧٢

تشابهات الحركة الخطية الدورانية ٢٠٠

تصادم تام المرونة ١٤٣

تصادم مرن ١٤٣

تصادمات ١٤٣

التطور النجمى ٨٥٨

تعميل الشحنات ٤٥٧

تعيين $0.26e/m$

تعيين الكثافة ٢٤٠

تغير الطور بالانعكاس ٣٨٢ ، ٧١٢

تفاعل ألفا الثلاثية ٨٦٠

التفاعل الاندماجي ٨٣٥

التفاعل الاندماجي في النجوم ٨٥٨

التفاعلات النووية ٨٢٨

التفاعل المتسلسل ٨٣٢

التقويم ٦٠٥

التكبير :

- في مكبر ٦٨٢

- ميكروسكوب ٦٨٣ - ٦٨٤

- لتلسكوب ٦٨٥

التلسكوب الأرضي ٦٨٦

التلسكوب اللاسلكي ٦٨٧

تلسكوب الموجات الدقيقة ٦٨٧

التمدد الحراري ٣٧٠

التناقض الظاهري للتوائم ٧٤٨

توازن ١١ ، ٥٧

توافقيات ٤٠٦

التوافقية في الموسيقى ٤١٥

تيار الازاحة ٦٢٥

التيار الدوامي ٥٧٦

التيار الكهربائي ٤٦١

- المجال المغناطيسي له ٥١٩

- جذر متوسط مربعه ٥٨٣

« ث »

ثابت الانحلال ٨٢٣

ثابت « بلانك » ٧٣٢

ثابت « بولتزمان » ٢٧٣

ثابت « رايدبرج » ٧٧٣

الثابت الزمني RC ٥٨٠

ثابت الزنبرك ٣٦٣

ثابت العزل ٤٧٤

ثابت الغاز ٢٧١

« ج »

الجاستروسكوب ٦٤٩

جاليليو والسقوط الذاتي ٤١

الجبهة الموجية ٤٠١

جدول الدوال المثلثية ٨٧٩

الجدول الدوري ٧٩٣ ، ٨٧٥

جدول الكثافات ٢٢٧

جدول الزوجة ٢٤٧

جزء ثنائي الاستقطاب ٤٧٥

جزء كيلو جرامي ٢٧٠

الجسم الأسود ٧٣٠

الجسيمات الأساسية ٨٤٥

جسيم ألفا ٨٢٦ ، ٨٣٧

جسيمات بيتا ٨٦٢ ، ٨٣٨

الجسيم المضاد ٨٤٦

الجلقانونومتر ٥٥٢

الجمع الاتجاهي للقوى ١٠

الجمع البياني للمتجهات ٣

جهاز الصوت ٤٠٢

جهاز رسم القلب الكهربائي ٥٩٩

جهاز رسم المخ الكهربائي ٥٠٩

الجهد الجيبي ٥٧١

الجهد الطرفي ٥٠٦

الجهد المتردد (أنظر أيضا دوائر التيار المتردد)

الجهد المطلق ٤٤٦

جواب النغمة ٤١٦

جوامد بللورية ٢٢٥

جوامد زجاجية ٢٢٦

« ح »

حالات المادة ٢٢٤

الحالة الأرضية ٧٨١

حالة مؤقتة الاستقرار ٨٠٦

حد المتسلسلة ٧٧٣ ، ٧٨٠

حد (مدى) المرونة ٢٢٨

حرارة الانصهار ٣٠٣

حرارة التبخير ٢٩٨

الحركة الاهتزازية ٣٥٩ - ٣٧٦

الحركة البراونية ٢٨٠

الحركة بعجلة منتظمة ٢٥ - ٤٨

الحركة الزاوية ١٦١ - ١٧٨

حركة التابع الأرضي ١٧١ ، ٢١٣

الحركة تحت تأثير الجاذبية ٨٣ - ٩٨

الحركة التوافقية البسيطة ٣٦٢ - ٣٧٣

الحركة الجيبية ٣٦٨

حركة جهاز القياس ٥٥٢

الحركة الدورانية (الزاوية) ١٦١ - ١٧٨

حركة جهاز القياس ٥٥٢

الحركة على مستوى مائل ٨٨

الحركة في مجال الجاذبية ٨٣ - ٩٨

الحركة المدارية ١٧٧

حركة المقذوف ٩٤

الحركة الموجية ٣٧٨ - ٣٨٨

الحركة الموجية على وتر ٣٧٩ - ٣٨٨

حلقات نيوتن ٧١٢

الحمل الحرارى ٣١٣

الحيود ٦٩٩ - ٧٢٣

- وحد التحليل ٧١٩

- بشق أحادى ٧٠٠ ، ٧١٧

- لأشعة أكس (X) ٧٢١

« خ »

خرافة القطب ٥٣٨

خطوط الطيف ٦٨٩ - ٧١٦

خطوط القوة ٤٣٩

الخلفية الاشعاعية ٨٤٣

الخواص الحرارية للمادة ٢٩١ - ٣١٧

الخواص الميكانيكية للمادة ٢٢٣ - ٢٥٦

« د »

دالة ايساي ٧٨٨

دالة الشغل ٦٠٥

الدالة الموجية ٧٨٨

- للايدروجين ٧٩٠

دائرة الاسناد ٣٦٦

دراسة طيف الأشعة تحت الحمراء ٨٠١

درجة الحرارة الفهرنيتية ٢٦٦

درجة حرارة « سلسيوس » ٢٦٦

درجة حرارة « كورى » ٥٣٩

درجة حرارة الكون ٨٦٠

درجة الصوت ٤٠٥

دفع ١٣٩

دفع نفثى ١٤٩

دفع صاروخى ١٤٩

دفع مضطرب ٢٤٥

دلو الثلج لفارادى ٤٣٢

الدوائر :

- التيار المتردد ٥٧٩ - ٥٩٨

- التيار المستمر ٤٨٥ - ٥١٢

- المنزلية ٥٠٣

- على التوالى ٥٨٩

دوائر التيار المتردد ٥٧٩ - ٥٩٨

- السعة فيها ٥٨٤

- القدرة فيها ٥٩٠

- المقاومة فيها ٥٨٣

الدوائر المصغرة ٦٠٨

الدورات الدينامية الحرارية ٣٧٧

دوران الأجسام الجاسئة ١٨٥ - ٢١٤

دورة « أوتو » ٣٨٨

دورة « كارنو » ٣٤١

دوى اختراق جدار الصوت ٤٢٠

الديناميكا الحرارية ٣٢٥ - ٣٥٣

دى بورلى ومدارات بوهر ٧٨٦

« ذ »

الذراع البصرى ٨٦

ذراع الرافعة ١٨٩

ذراع العزم ١٩١

ذرة بوهر ٧٧٤

الذرة النووية ٧٧٠

« ر »

- الراديو ، (دائرة رنانة) ٦٢٠
- رأس القلب القذفي ١٥٦
- « رذرفورد » والذرة ٧٧٠
- رسم بيان الجسم الحر ٤
- الرسم البياني لمستويات الطاقة ٧٨١
- للايدروجين ٧٨١
- رسم مسار الأشعة :
- لمرآة مقعرة ٦٥٨
- لمرآة محدبة ٦٥٧
- لعدسة ٦٦٢
- الرطوبة ٣١٥
- الرطوبة النسبية ٣١٥
- الرنين ٣٧١
- رنين الأنابيب ٤١٣
- رنين أنبوبة الأرغن ٤١٣
- رنين الزنبرك ٣٩٢
- رنين الصوت في الأنابيب ٤١٤
- الرنين في دائرة LC ٥٩١
- رنين القضيب ٣٨٩ ، ٣٩٤
- الرنين الكهربائي ٥٩١
- رنين الموجات في الذرات ٧٨٧

« ز »

- زاوية الانحراف ٦٨٦
- الزحزحة الحمراء ٨٦٣
- زمن الاهتزاز ٣٦٥
- الزئبق الكروي ٦٥٢ ، ٦٧٨

« س »

- السرعة ٢٦ - ٣١
- سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية ٦٣٠
- السرعة الجزيئية في الغازات ٢٧٩
- السرعة الزاوية ١٦٣
- سرعة الصوت ٤٠٢

سرعة الضوء ٦٤٠

- السرعة اللحظية ٢٧ - ٣١
- سرعة الموجات التضاغية ٣٩٤
- السرعة المماسية ١٦٨
- سرعة الموجة على وتر ٣٨١
- السرعة النهائية ٧٥
- السرعة والميل ٢٨ - ٣١
- سعر (كالورى) ٢٩٤
- السعر الغذائي ٢٩٤
- سعة الاهتزاز ٣٦٢
- السعة الحرارية ٢٩٥ - ٢٩٨
- السعة الحرارية النوعية ٢٩٥ - ٢٩٨
- السعة المكافئة ٤٩٥
- السقوط الذاتي ٤٢ - ٤٦ ، ٩٤
- السلام الموسيقية ٤١٥
- سونار ٤٢٤

« ش »

- الشحن بالحث ٤٣١
- الشحنة :
- وانحرافها في مجال B ٥٢٥
- وانواعها ٤٢٨
- وحركاتها في مجال E ٤٥٧
- على مكثف ٤٧٣
- شحنة الاختبار ٤٣٨
- الشحنة النقطية :
- مجاها ٤٣٩
- جهدها ٤٤٧
- الشدة - تعريف ٣
- شدة الصوت ٤٠٢
- شدة المجال الكهربائي E ٤٣٩
- شدة المجال المغناطيسي H ٥٤٢
- الشرط الأول للتوازن ١٤
- الشرط الثانى للتوازن ١٨٧
- الشغل ١٠٤
- شغل التمدد ٣٢٩

المشغل السالب ١٠٧

الشفل الكهربائي ٤٤٤

الشفل والمساحة ٣٣٩ - ٣٣٠

الشفل المزدوج ليونج ٧٠٣

« ص »

الصفر المطلق ٢٦٩

الصمام الثنائي ٦١٠ - ٦٠٥

الصوت ٤٢٦ - ٣٩٩

الصورة التخيلية ٦٥٠

الصورة التقديرية ٦٥٠

الصورة الحقيقية ٦٥٣

صورة «لاوه» ٧٢٣

« ض »

الضربات ٤١٢

الضغط ١٥٠

الضغط الأوزموزي ٢٨١

ضغط البخار ٣١٦ ، ٣٠٢

ضغط بخار الماء ٣١٦

ضغط البخار المشبع ٣١٦ ، ٣٠٢

الضغط الجوي ٢٤٣ ، ٢٣٦ - ٢٣٥

الضغط الجوي العياري ٢٤٣

ضغط الغاز المثالي ١٥٠

الضغط في الموائع ٢٣٢

الضغط وطاقة الحركة الجزيئية ١٥٣

الضوء المتناكسك ٨٠٤ - ٨٠٢

الضوء المتوازي ٦٤٣

الضوء المستقطب ٦٨٩

طاقة الترابط ٨٢١

الطاقة الحرارية ٢٩٢

طاقة الحركة ١٠٩

طاقة الحركة الدورانية ٢٠٨

طاقة الحركة من خلال النسبية ٧٥١

الطاقة الداخية ٣٢٧ ، ٢٩٢

طاقة الزنبرك ٣٦٣

طاقة الوضع الثقالية ١١٣

طاقة الوضع الكهربائية ٤٤٣

طاقتي الحركة والوضع للبندول ١٢٠

طبقات الأرض ٨٦٧

الطبقة المغلفة ٨٦٧

الطريقة الصحيحة للدفع ١٩٨

طول المسار الضوئي ٧١١

الطول الموجي ٣٨١

الطول الموجي «لدى برولي» ٧٥٤

الطول الموجي للضوء ٦٣٩

الطول الموجي المشرق ٧٣٤

طول النظر ٦٧٥

طويل النظر ٦٧٥

الطيف :

- الموجات الكهرمغناطيسية ٦١٨

- وأنواعه ٧٩٨ ، ٧١٦

الطيف الخطي ٧٩٨ ، ٧١٦

الطيف الصوتي ٤٠٨

الطيف الشريطي ٨٠١

الطيف المستمر ٧٩٨ ، ٧١٦

« ظ »

ظاهرة «دوبلر» ٤١٧

ظاهرة «كومتون» ٧٣٨

« ع »

عازل ٤٧٨ - ٤٧٤

عامل التحويل ٨٧٣ ، ٣٢

« ط »

الطاقة :

- في مكثف ٤٧٨

- بقاؤها ١٢٢

- في مجال كهربائي ٤٧٩

طاقة الاهتزاز ٣٦٣

طاقة التأين ٧٨٥

عامل القدرة ٥٩٠

العجلة ومحور العجلة ١٣٠

عداد الوميض ٨٤٠

عداد « جيجر » ٨٣٩

عدد « أفوجادرو » ٢٧٠

العدد الذرى ٧٧١ ، ٨١٦

عدد « رينولدز » ٢٦٠

عدد الكتلة الذرى ٨١٤

العدد الكمي الرئيسى ٧٨٩

العدد الكمي للتدويم ٧٩٣

العدد الكمي المدارى ٧٩٢

العدد الكمي المغناطيسى ٧٩٢

العدد الماخى ٤٢٠

العدسة :

- مجموعة العدسات ٦٦٦

- الكهربية ٧٦٣

- ومعادلتها ٦٦٤

- وأنواعها ٦٦١

عدسة لالونية ٦٧٩

العدسة المكبرة ٦٨٠

عزم الازدواج على عروة تيار ٥٥٥

عزم الدوران ٢٠٤

عزم القصور الذاتى ٢٠٤ - ٢٠٥

العزم المغناطيسية ٥٥٧

عقدة ٣٨٤

العلاج بالانفاذ الحزلى ٦٣٥

العلاقة بين الباوند والنيوتن ١٣

العلاقة بين الجول والقدم . باوند ١٠٦

العلاقة بين الطول الموجى والسرعة والتردد ٣٨١

العلاقة بين عزم الدوران والتسارع الزاوى ٢٠١٥

العلاقة بين الكتلة والطاقة ٧٥٠

عمر الأرض ٨٦٤

- من النشاط الاشعاعى ٨٦٤

عمر الكون ٨٦٤

عمر النصف ٨٢٣

عمليات احصائية ٣٤٧

عملية أدياباتية ٣٣٤

عملية أيسومثرية ٣٣٢

عملية تخفيف الضغط بالحقن ٣٣٦

عناصر الدائرة ٤٥٥ - ٤٨٢

العوازل الكهربائية ٤١٩

العين ٥٧٠

« غ »

Cp-Cv للغازات ٢٩٧

الغرفة السحابية ٨٣٩

غرفة الفقاعات ٨٣٩

غلاف مضاد للانعكاس ٧٢٦ - ٧٢٧

غليان ٢٩٨

« ف »

الفائدة الميكانيكية ١٢٧

الفائدة الميكانيكية الفعلية ١٢٧

الفائدة الميكانيكية المثالية ١٢٧

فرق الجهد ٤٤٣

فروض النسبية ٧٣٩

الفصول ٢١٣

الفوتون ٧٣٦

- كمية تحركه ٧٥٣

- كتلة السكون له ٧٥٣

الفيزياء الذرية ٧٦٩ - ٨١٠

الفيزياء النووية ٨١٣ - ٨٥٢

« ق »

قاطع الدائرة ٥٠٣

قاعدة أرشميدس ٢٣٧

قاعدة العروة لكيرتشوف ٤٨٧

قاعدة النقطة لكيرتشوف ٤٨٦

قاعدة اليد اليمنى ٥٢٠ - ٥٢٢

قانون « أمبير » ٥٢٩

قانون الانحلال فى النشاط الاشعاعى ٨٢٣

قانون الانعكاس ٦٤٣

القانون الأول للديناميكا الحرارية ٣٢٧

قانون «باسكال» ٢٣٦

قانون «بوازيل» ٢٤٧

القانون الثاني للديناميكا الحرارية ٣٤٤ ، ٣٤٩ - ٣٥١

قانون الجاذبية ٨

قانون «دالتون» للضغوط الجزئية ٢٨٢

قانون «ستيفان» ٣١٥

قانون «سنل» ٦٤٥

قانون الغاز ٢٦٨ - ٢٧٨

قانون الغاز المثالي ١٥٣ ، ٢٧٠ - ٢٧٢

قانون «فاراداي» ٥٦٢

قانون الفعل ورد الفعل ٥٧

قانون «كولوم» ٤٣٤

قانون «لنز» ٥٦٢

قانون نيوتن الأول ٥٥

قانون نيوتن الثاني ٥٨

قانون نيوتن الثالث ٥٧

قانون «نيوتن» للتبريد ٣١٥

قانون «نيوتن» للجاذبية ٨٤

قانون «هوك» ٢٢٨ ، ٣٦٢

القدرة ١٠٨

قدرة الحصان ١٠٨

القدرة الكهربائية في دوائر التيار المتردد ٥٩٠

القدرة الكهربائية ٥٠١

- ونقلها ٥٩٤

ق.د.ك المضادة (العكسية) ٥٧٣

قصر النظر ٦٧٥

قصير النظر ٦٧٥

قطرة الزيت لمليكان ٤٩٧

القوة الجاذبة المركزية ١٦٩

قوة الاحتكاك ٧٢

القوة والحركة ٥٣ - ٧٦

القوة الاحتفاظية ١١٥

القوة الالكتروستاتية ٤٢٩ - ٤٣٥

قوة التعويم (أو الدفع) ٢٣٧

قوة التكبير ٦٨١

القوة الدافعة الكهربائية ٤٥٧

- المستحثة ٥٥٩ - ٥٦٣

- ملف يدور ٥٦٩

- وقياسها ٥٠٨

- الحركية ٥٦٥

- وفرق الجهد الطرفي ٥٠٦

قوة العدسة ٦٨٠

القوة العمودية ٧٣ ، ٨٦

القوة المؤثرة على تيار ٥٢٠

القوة المؤثرة على شحنة تتحرك ٥٣٧

القوة النووية ٨٢٩

قوة العدد (١٠) ٦٤ ، ٨٧٤

قياس الجرعات ٨٤١

قياس ضغط الدم ٢٥٣

قيم جذر متوسط المربع (RMS) ٥٨١

القيم الفعالة ٥٨٣

« ك »

كالوريك ٢٦٤

كاميرا الخزانة ذات الثقب ٦٩٥

كتلة ٦٠

الكتلة الحرجة ٨٣٣

الكتلة في النظرية النسبية ٧٣٩

الكتلة والوزن ٦١

كثافة ٢٢٦

كفاءة المحرك الحراري ٣٣٩ ، ٣٤٠ - ٣٤١

كفاءة المكنة ١٢٨

كم الشحنة ٤٣٥

كم الضوء ٧٣٦

كمية التحرك الخطي ١٣٧

كمية التحرك الزاوي ٢١١

كمية تحرك الفوتون ٧٥٣

كمية غير متجهة ٢

الكهرية الاستاتية ٤٢٧ - ٤٥١

الكون ، درجة حرارته ٨٦٠

الكون المتمدد ٨٦٢

الكونت «رمفورد» ٢٦٤

كيلو جرام ٦٣

كيلوواط ساعة ١٠٩

« ل »

لاستجمية ٦٧٦

الزوجة ٢٤٦

الليزر ٨٠٤

« م »

مائع ٢٢٤

مبدأ « باولي » للاستبعاد ٧٩٢

مبدأ التراكب ٣٨٣

مبدأ الشفط ٢٥٣

مبدأ عدم التحديد لها ينبرج ٧٥٦

مبرد ٣٤٢

المتجهات ١ - ١٣

متجة الاراحة ٢

متجة المجال المغناطيسي ٥٢٠

متساويات الجهد ٤٤٥

المتسلسلات الاشعاعية ٨٢٥

متسلسلات الانحلال ٨٢٧

متسلسلة « باشن » ٧٧٤

متسلسلة « بالمر » ٧٧٣

متسلسلة « ليمان » ٧٧٤

متسلسلة اليورانيوم ٨٢٧٠

متغيرات الحالة ٣٢٦

متوسط السرعة ٢٦ ، ٣٥

المجال :

- الكهربائي ٤٣٨

- الجاذبية ٨٧

- المغناطيسي ٥١٨

المجال الاحتفاظي :

- الكهربى ٤٤٥

- الجذبي ٨٧

مجال الجاذبية ٨٧

المجال الكهربائي ٤٣٨

- وحركة الشحنة فيه ٤٥٦

- فى عازل ٤٧٧

- فى معدن ٤٤٢

- لأنظمة مختلفة ٤٤١

المجال المغناطيسى :

- للتيار ٥١٩

- لعروة ٥٣٣

- وتخطيطه ٥١٨

- فى ملف حلزوني ٥٣٤

- للملف حلقى ٥٣٦

المجال المغناطيسى للأرض ٥٢٨

مجاوزية الفراغ الحر ٤٧٣ ، ٦٣١

المجرات ٨٥٦

مجزىء الجهد ٥٠٩

مجموعات العدسات ٦٦٦

المحاثية ٥٦٣ - ٥٦٥

- فى دائرة تيار متردد ٥٨٧

المحاثية الذاتية ٥٦٤

المحاثية المتبادلة ٥٦٣

المحرك ٥٧٢

محزوز الحيوذ ٧١٣

المحول ٥٩٤

مدار بوهز وموجات دى برولى ٧٨٧

المدفع الالكترولى ٤٥٩

المذبذب والشرط الكمى له ٧٣٢

المرآة المستوية ٦٤٨

المرآة الكروية ٦٥٠

المرآة المقعرة ٦٥٠ - ٦٥٦

مرآة مكافئة المقطع ٦٥٢

المرشحات الكهربائية ٥٩٩

مركبات المتجة ٥

المركبات المتعامدة للمتجهات ٥

مركز الثقل ١٨٦

مركز الكتلة ١٨٦

المسافة المماسية ١٦٧

المسافة الموسيقية ٤١٥

مستوى شدة الصوت ٤٠٣

مصدر طاقة الأرض ١٢٤

المصطلحات الفنية ٧

مصهر ٥٠٣

المضائلة الحرجة أو حرج المضائلة ٣٧١

المضادة المغناطيسية ٥٧٦

مضخة حرارية ٣٤٢

مطاوعة ٢٣٢

مطياف الكتلة ٨١٧

مطياف المحزوز ٧١٣

المطياف المنشوري ٦٨٦

معادلات الحركة الخمس ٣٨

معادلات الحركة الزاوية ١٦٥

معادلات الحركة المنتظمة ٣٨

معادلة «براج» ٧٢٢

معادلة برنولي « ٢٥٠

معادلة التكبير ٦٥٥

معادلة «شروود ينجر» ٧٦٠

معادلة العدسة الرقيقة ٦٦٤

المعادلة الكهروضوئية ٧٣٧

معادلة المحزوز ٧١٥

معادلة المرآة ٦٥٩

معامل ٢٣٠

معامل الاحتكاك ٧٣

معامل الانكسار ٦٤٥

— جدول ٦٤٠

معامل التحويل ٨٧٣ ، ٣٢

معامل تغير المقاومة مع درجة الحرارة ٤٦٩

معامل التمدد الحراري ٣٠٨

معامل الحجم ٢٣٢

معامل الجودة ٨٤١

معامل القص ٢٣١

المعادلة الموجية ٧٨٨

معامل النسبية ٧٤٩

معامل «يونج» ٢٣١

المعاوقة ٥٨٨

مغناطيس ٥١٨

المغناطيسية ٥١٧ - ٥٤٧

المغناطيسية الحديدية ٥٣٨

المغناطيس الكهربائي ٥٤١

المفاعل النووي ٨٣٤

مفاعلة حثية ٥٨٨

مفاعلة سعوية ٥٨٦

مفرط الموصلية ٤٧٢

المقاومات : ٤٦٤ - ٤٦٦

— على التوازي ٤٩١

— على التوالي ٤٩٢

المقاومة : ٤٦٦

— في دائرة تيار متردد ٥٨٢

— وتغيرها مع درجة الحرارة ٤٦٨

المقاومة الداخلية للبطارية ٥٠٧

المقاومة المكافئة ٤٩٢

المقاومية ٤٦٨

المقومات ٦١١

مقاييس درجة الحرارة ٢٦٥

مقياس التداخل «ليكلسون» ٧٠٩

مقياس الجهد ٥٠٨

مقياس ديسيل ٤٠٣

مقياس كلفن ٢٦٦ ، ٢٦٩

المقياس نصف القطري ١٦٢

مكبس ايدرولي ٢٣٦

المكثف ذي اللوحين المتوازيين ٤٧٣

المكثفات ٤٤٤ ، ٤٧١

— في دائرة تيار متردد ٥٨٤

— وشحنها ٥٨٠

— طاقتها ٤٧٨

— على التوازي ٤٩٥

— على التوالي ٤٩٥

— والثابت الزمني لها ٥٨٠

المكشاف الكهربي (الالكتروسكوب) ٤٣٠

المكنات ١٣٦ - ١٣٠

مكنة الصندوق الأسود ١٢٦

الملف ، عزم الازدواج المؤثر عليه ٥٥٦

مناطق الاسناد ٧٤٠

مناطق الاسناد القصوري ٧٤

المناطق المغناطيسية ٥٣٩

متنقص السرعات ٥٢٦

منحنى $B-H$ ٥٤١

المنشور ٦٨٨

المواد ذات الفعالية البصرية ٦٩٢

المواد المغناطيسية ٥٣٨

نظرية الانفجار العظيم ٨٥٤
نظرية « بلانك » للإشعاع ٧٣٠
نظرية توريشيللي ٢٥١
النظرية الحركية للغازات ٢٨٠
نظرية الشغل والطاقة ١١٦
نظرية المحاور المتوازنة ٢٢١
نظرية النسبية الخاصة ١٤٧ ، ٧٣٩
نظير ٨١٦ ، ٨١٨
- جدول ٨٧٦
نغمة توافقية ٤٠٦
النقص الكتلي ٨١٩
النقطة البعيدة للعين ٦٧٥
النقطة الثلاثية ٢٧٦
النقطة القريبة للعين ٦٧٥
النواة :
- نصف قطرها ٧٧١ ، ٨١٤
- استقرارها ٨٢١ - ٨٢٩
- رمزها ٨١٥
نوع الصوت ٤٠٥
النوية ٨١٤
النيوترون ٨١٤
- مداه في المادة ٨٣٨
النيوترينو ٨٥٩

« ه »

هبوط الجهد ٤٦٨
الهليوم المؤين ٧٨٢

« و »

الوحدات SI ٦٣
الوحدات القياسية ٥٢
وحدات الشغل ١٠٦
الوحدات الكهربائية ٦٣١
الوحدات المترية ٦٣
وحدة الالكترون فولت ٤٦٠

الموائع المتحركة ٢٤٥
الموت الحراري للكون ٣٥٢
الموجات التضاغية ٣٩١
موجات تضاغية في زنبرك ٣٩٢
الموجات الدقيقة ٦٩٨
الموجة الصدمية ٤٢٠
الموجات الطولية ٣٩١
الموجات فوق السمعية ٤٠٤
الموجات المتناسكة ٨٠٢ - ٨٠٤
موجات مستعرضة ٣٨٠
الموجات المستقرة ٣٨٦
موجة مستقطبة استوائيا ٦٩٠
الموجة المستوية ٦٤١
الموصل الكهربائي ٤٢٩
الموصلية الحرارية ٣١٤
الموصلية الكهربائية ٤٦٩
مول ٢٧٠
مولد التيار المتردد ٥٦٧
المولد الكهربائي ٥٦٧
ميزان « كافندش » ٨٥
ميكانيكا الكم ٧٥٨
الميكانيكا الموجية ٧٥٨
الميكروسكوب (المجهر) ٦٨٣
الميكروسكوب الالكتروني ٧٦٠

« ن »

نبذة عن النسبية ١٤٧
نجم العملاق الأحمر ٨٥٩
نجم القزم الأبيض ٨٦١
النجوم ٨٥٦ ، ٨٦١
النسبية ٧٣٩ - ٧٥٢
النشاط الإشعاعي ٨٢٢
نصف قطر الحركة التدويمية ٢٠٤
نصف القطر النووي ٨١٤
النظام البيطاني للوحدات ٦٣
النظام ضد الفوضى ٣٤٥
نظرية « أمبير » للمغناطيسيات ٥٣٧

- فاراد Farad ٤٧٣
 - فولت Volt ٤٤٤
 وحدة الكتلة الذرية ٨١٤ ، ٨١٦
 - الكوري Curie ٨٢٤
 - كولوم Coulomb ٤٣٤
 وحدة متر Metre ٦٢
 - نيوتن Newton ٦٤
 - هنري Henry ٥٦٤
 - هيرتز Hertz ٣٦٢
 - واط Watt ١٠٨
 - ويبر Weber ٥٢٩
 وزن ١١
 الوزن الظاهري ١٧٥
 الوزن في المصعد ٦٨
 وزن القمر ٨٧
 الوزن النوعي ٢٢٧
 الوزن والكتلة ٦١

وحدة :
 - أمبير Ampere ٤٦١
 - أوم Ohm ٤٦٥
 - باوند Pound ٦٥
 - بوير Poise ٢٤٧
 - تسلا Tesla ٥٢١
 - تورر Torr ٢٠٣
 وحدة :
 - جاوس Gauss ٥٢٢
 - جول Joule ١٦
 الوحدة الحرارية البريطانية BTU ٢٩٤
 وحدة دايون Dyne ٦٤
 - ديباي Debye ٤٧٥
 - ديوبتر Dioptr ٦٧٩
 - راد Rad ٨٤١
 - رم Rem ٨٤١
 - رونتجن Roentgen ٨٤٣
 - سلج Slug ٦٥

PRINCIPLES OF PHYSICS

Bueche

صدر أيضا للنشر فى الفيزياء

- فيزياء السنة الأولى الجامعية (شوم)
- مقرر بيركلى فى الفيزياء (المجلد الأول - الميكانيكا)
- مقرر بيركلى فى الفيزياء (المجلد الثانى - الكهربائية والمغناطيسية)
- مقرر بيركلى فى الفيزياء (المجلد الرابع - الفيزياء الكمية)
- الفيزياء العملية
- أساسيات البصريات
- العلوم الفيزيائية للفنيين
- الفيزياء - أسئلة ومسابئلة محلولة لطلبة الثانوية العامة (تحت الطبع)

تطلب من :

الدار الدولية للنشر والتوزيع

٣٨ ش الأهرام - روكسى - مصر الجديدة

ص.ب ٥٥٩٩ هليوبوليس غرب - القاهرة

تليفون : ٢٥٨٢٨٨٧

تلكس : ٢٠٠٧١/٢٠٠٧٠ PBCRB UN

فاكس : ٠٠٢٠٢/٢٩١٨٠٥٩

INTERNATIONAL PUB. & DIST. HOUSE

CAIRO — KUWAIT — LONDON

ISBN: 977-5107-01-6

